INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



MOSAICOS ROMANOS DE MERIDA

Enero 1979

170 Ptas.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 28
Enero 1979



SCIENTIFIC AMERICAN

COMITE DE REDACCION Gerard Piel (Presidente); Dennis Flanagan, Francis Bello, Philip Morrison; Trudy E. Bell; Judith Friedman; Brian P. Hayes; Jonathan B. Piel; John Purcell; James T. Rogers; Armand Schwab, Jr.; Jonathan B. Tucker; Joseph Wisnovsky

DIRECCION EDITORIAL Dennis Flanagan
DIRECCION ARTISTICA Samuel L. Howard
PRODUCCION Richard Sasso
DIRECTOR GENERAL Donald H. Miller, Jr.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR Francisco Gracia Guillén
REDACCION José María Valderas Gallardo (Redactor Jefe)
Encarna de Blas (Secretaria de Redacción)
PRODUCCION César Redondo Zayas
PROMOCION Y PUBLICIDAD Elena Sánchez-Fabrés
PROMOCION EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (ESPAÑA)

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Ramón Pascual: *Energía de fusión con haces de partículas;* Miguel Viñas: *El ensamblaje de un virus;* Amando García: *La óptica de rayos X de longitud de onda larga;* Manuel Puigcerver: *Cúmulos ricos de galaxias;* Pedro Molera: *Los mecanismos del mecanizado por abrasión;* Jesús Palomeque: *El sistema de recompensa del cerebro;* Juan José Martínez: *El sistema de control de vuelo de los hermanos Wright;* Luis Bou: *Juegos matemáticos;* José E. Myro y Alicia Menéndez: *Taller y laboratorio.*

Hace...

José M.ª López Piñero

Ciencia y Sociedad:

Alfredo Pastor

Libros:

Raimundo Goberna, Luis Mas y Philip Morrison



LA PORTADA

La costumbre de pavimentar las mejores habitaciones de la casa con mosaicos de teselas la habían implantado los griegos en el período helenístico y de ellos la adoptaron los romanos, sus difusores por las provincias occidentales del imperio. Mérida, *Augusta Emerita,* fundada por el emperador Augusto, a través de su legado Publio Carisio, conserva unos 70 mosaicos de pavimento (véase "Mosaicos romanos de Mérida", por Antonio Blanco, en este mismo número). La portada recoge la Alegoría del invierno. Es normal que el invierno esté representado por una mujer velada y enlutada, pero el rostro tiene una fisonomía tan personal que cabría sospechar la presencia de un retrato anterior.

Suscripciones:
Prensa Científica, S.A.
Calabria 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 41

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 1870 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 36 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
190 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
270 pesetas

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S.A.
Ausias March, 49; Barcelona-10

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S.A.
Calabria, 235-239; Barcelona-29

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137; Madrid-30
Tel. 439 41 50 ext. 468
Cataluña:
Miguel Munill
Balmes, 191, 2.º, 3.ª; Barcelona-6
Tels. 218 44 45 y 218 40 86

Controlado por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Fotografía de la portada de Antonio Blanco

Página	Fuente
9-11	George V. Kelvin
12	Physics Internacional Company
13-14	George V. Kelvin
15	Sandia Laboratories
16-17	George V. Kelvin
18	Sandia Laboratories
19	George V. Kelvin
22	Allen Beechel
23	John T. Finch
24-26	Allen Beechel
27	Allen Beechel (*arriba*) Geneviève Lebeurier (*abajo*)
28-29	Allen Beechel
33	Eberhard Spiller and Ralph Feder
34-35	Eberhard Spiller, Ralph Feder and J. Topalian (*arriba*) Adolph E. Brotman (*abajo*)
36-37	Adolph E. Brotman
38	Eberhard Spiller and Ralph Feder
39	Adolph E. Brotman
40	Eberhard Spiller y Ralph Feder
41	National Aeronautics and Space Administration
47-53	Antonio Blanco
55	© National Geographic-Palomar Observatory Sky Survey (*arriba*), Cerro Tololo Inter-American Observatory (*abajo*)
56	Cerro Tololo Inter-American Observatory (*arriba*), Lick Observatory (*abajo*)
57	Paul Gorenstein
58	Gabor Kiss
59	Ilil Arbel
60	Hale Observatories
61	Kitt Peak National Observatory
62	© National Geographic-Palomar Observatory Sky Survey (*arriba*), Ilil Arbel (*abajo*)
63	Paul Gorenstein
64	Hale Observatories (*arriba*), Ilil Arbel (*abajo*)
67	Ben Rose
68	Walken Graphics (*arriba*) Ben Rose (*abajo*)
69	Leonard E. Samuels
70	Walken Graphics
71-72	Leonard E. Samuels
73	Walken Graphics
74	Ben Rose
77	Brigitte Berger
82	Olle Lindvall
86	The Bettmann Archive
88-89	Dan Todd
90-93	The Bettmann Archive
94	Dan Todd
95	Saabfoto
96-97	Dan Todd
100	Dan Todd
103-108	Michael Goodman

Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición: Tecfa
Guipúzcoa, 36 (local 1) Barcelona-20
Cayfosa. Santa Perpetua de Moguda
Barcelona.
Printed in Spain - Impreso en España

Cartas

Señor Director:

En el número 24 de INVESTIGACION Y CIENCIA, correspondiente al mes de septiembre de 1978, aparece un interesante y profundo artículo sobre monopolos, que tan concisa y brillantemente desarrollan los profesores Pedro Pascual y Rolf Tarrach.

No obstante, por error de transcripción, traducción o cualquier otro motivo, no se precisó que la luz no giraba al hacerla pasar por un campo magnético. Es necesario un medio dieléctrico, siendo las variaciones producidas por el campo magnético, en las características del dieléctrico que sirve como medio, las que hacen posible el mencionado giro del plano de polarización de la luz, linealmente polarizada.

No siendo, pues, un fenómeno de acción directa del campo magnético sobre la radiación electromagnética visible.

GABRIEL CARRETIE GONZALEZ

Maquinista Naval Jefe
Bilbao

Señor Director:

Lo que se afirma en la anterior carta es cierto, pero está fuera de lugar en una descripción general de los fenómenos electromagnéticos como la que se presenta en la introducción de nuestro artículo sobre monopolos.

PEDRO PASCUAL y
ROLF TARRACH

Facultad de Física
Universidad de Barcelona

Señor Director:

En el artículo "Organismos que captan corrientes" (de Steven Vogel, octubre de 1978) el autor describe unos interesantísimos mecanismos físicos por los que muchos animales y plantas se benefician de la captación y/o inducción de corrientes de agua o de aire. Los ejemplos son numerosos y la utilidad de tales mecanismos es variada, según la biología de cada grupo de organismos en particular.

Sin embargo, el beneficio selectivo que obtienen dos de los tipos de organismos que el autor comenta parece ser aún mayor que el que se describe en el artículo. Efectivamente, existe una ventaja que parece menos hipotética que la aducida por el autor (disponer de mayor espacio para el desarrollo de las gónadas al poderse reducir el tamaño de las branquias) con respecto a la inducción de corrientes en los fisurélidos. Se trata de la acción de arrastre que la corriente creada en la cavidad paleal de estos gasterópodos produce sobre los productos de desecho; excretas y heces se eliminarían así más fácilmente.

Asimismo, las corrientes de agua inducidas en las esponjas eliminan las excretas en estos animales, además de impedir el retorno del agua ya filtrada y el bajo rendimiento energético derivado de filtrarla por segunda o sucesivas veces, como el autor señala.

JOANDOMENEC ROS

Departamento de Ecología
Facultad de Biología
Universidad de Barcelona

Señor Director:

La ilustración del sincrotrón de protones del Fermi National Accelarator Laboratory, que aparece en la página 31 del número del pasado diciembre de INVESTIGACION Y CIENCIA tenía un sorprendente parecido con las fotografías aéreas en otro artículo del mismo número: "Los dibujos prehistóricos en el suelo de Perú", sobre todo la fotografía de la página 69 de la Pampa Colorada. Ambas imágenes tienen espirales ampliamente espaciadas y anchas líneas que siguen direcciones diferentes; parecen variantes de un mismo tema. Quizás algún arqueólogo de un lejano milenio futuro podría sacar la conclusión, fijándose sólo en el diseño, de que los modelos provenían de una misma civilización o de civilizaciones íntimamente relacionadas.

Funcionalmente uno y otro esfuerzo tienen algunos puntos en común: ambos representan dos importantes intentos sociales con un notable impacto económico. Ambos parecen reflejar la comprensión, por parte de sus respectivas sociedades, de las reglas básicas del universo: la nuestra, a una escala subnuclear, y la de los Nazcas a la escala, quizá, del sistema solar.

ROBERT N. SOLLOD

New York University
New York

Los autores

GEROLD YONAS ("Energía de fusión con haces de partículas") tiene a su cargo el departamento de investigación de la fusión en los Sandia Laboratories en Albuquerque, New Mexico. Diplomado en ingeniería física por la Cornell University, se le concedió una beca Guggenheim para graduarse en el Instituto de Tecnología de California. Mientras estuvo en Cal Tech trabajó en el Jet Propulsion Laboratory como científico senior en física de fluidos. Después de recibir su doctorado, en 1966, pasó a la Physics Internacional Company; allí investigó en haces de partículas de intensidad elevada. En 1972 Yonas se trasladó a los Sandia Laboratories, en donde dirige un centenar de investigadores que trabajan en la aplicación de haces intensos de electrones e iones a las reacciones de fusión controladas.

P. JONATHAN G. BUTLER y AARON KLUG ("El ensamblaje de un virus") forman parte del Medical Research Council Laboratory of Molecular Biology, en Cambridge –Inglaterra–. Butler cursó estudios en la Universidad de Cambridge, donde se doctoró en 1967. Desde entonces sus investigaciones han derivado desde la química de las proteínas hasta las interacciones de proteínas y ácidos nucleicos, utilizando los virus como modelo. Klug es jefe de coordinación del laboratorio de la división de estudios estructurales. Nacido en Sudáfrica, graduado en la Universidad de Witwatersrand, licenciado en la Universidad de Ciudad del Cabo y doctor por la Universidad de Cambridge en 1952. Desde 1958 hasta 1961 fue director del proyecto de investigación vírica en el Birkbeck College y, en 1962, se incorporó al laboratorio de biología molecular. Las investigaciones de Klug se han centrado en el desarrollo de técnicas para cristalografía por rayos X y microscopía electrónica aplicadas al análisis estructural del virus del mosaico del tabaco, ARN de transferencia, microtúbulos y cromatina.

EBERHARD SPILLER y RALPH FEDER ("La óptica de rayos X de longitud de onda larga") pertenecen a la plantilla del laboratorio de investigación Thomas J. Watson, de la Internacional Business Machines Corporation. Eberhard Spiller nació en Alemania. En el año 1964 obtuvo el título de doctor en física por la Universidad de Frankfurt. Tras trabajar cuatro años en esta Universidad, ingresó en la IBMC. Ralph Feder estudió en la Universidad de Indiana. Más tarde trabajó en el laboratorio Pitman Dunn del Frankford Arsenal de Filadelfia. En el año 1953 recibió su título de graduado en física (Master) en la Universidad de Pennsylvania. Tras disfrutar de una beca del ejército en la Universidad de Birmingham, ingresó en el Centro de Investigación Watson.

ANTONIO BLANCO FREIJEIRO ("Mosaicos romanos de Mérida") es catedrático de arqueología de la Universidad Complutense de Madrid. Nacido en Marín (Pontevedra), estudió en las Universidades de Santiago, Madrid, Oxford y Heidelberg, en estas dos últimas como becario de las fundaciones Conde de Cartagena y Alexander von Humboldt, respectivamente. Ha sido conservador de escultura clásica del Museo del Prado, catedrático de arqueología, epigrafía y numismática de la Universidad de Sevilla y director de la Academia Española de Bellas Artes en Roma. Autor de numerosos libros y artículos, acaba de dar a la imprenta el "Corpus" de mosaicos romanos de Mérida.

PAUL GORENSTEIN y WALLACE TUCKER ("Cúmulos ricos de galaxias") son astrofísicos, el primero experimental y el segundo teórico. Gorenstein es miembro del Centro de Astrofísica del Observatorio de Harvard College y del Observatorio Astrofísico Smithsoniano. Realizó su primer ciclo universitario en la Universidad Cornell y su doctorado en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) en 1962. Después de pasar un año en Italia con una beca Fulbright, trabajó en la división de ciencias espaciales de la firma American Science and Engineering, Inc., antes de entrar en la recién creada división de astrofísica de alta energía del Centro de Astrofísica en 1973. Gorenstein está en la actualidad ocupado en el desarrollo de un detector de rayos X para el segundo observatorio astronómico orbital de alta energía *(HEAO-2)*. Tucker es un astrofísico independiente que viven en Fallbrook, California. Estudió en la Universidad de Oklahoma y en la Universidad de California en San Diego, que le otorgó el doctorado en 1966. Tras dos años como profesor adjunto de ciencias espaciales en la Universidad Rice, trabajó en American Science and Engineering, trasladándose en 1971 al sur de California.

LEONARD E. SAMUELS ("Los mecanismos del mecanizado por abrasión") es el responsable de la división de metalurgia del laboratorio de investigación de materiales del Departamento de Defensa de Australia. Se educó en la Universidad de Melbourne, donde obtuvo el doctorado en ciencias dentro de la especialidad de ingeniería metalúrgica en 1958. Su interés en el mecanizado por abrasión empezó con los intentos de mejorar los métodos de preparación de las superficies metálicas para el examen microscópico, lo cual le llevó al convencimiento de que es necesario comprender cómo actúa el mecanizado por abrasión y qué ocurre en la superficie del metal. En 1976 Samuels fue profesor invitado en la Universidad estatal de Ohio, Estados Unidos.

ARYEH ROUTTENBERG ("El sistema de recompensa del cerebro") enseña psicología y ciencias biológicas. Dirige asimismo el programa de neurología de la Universidad Northewestern. Obtuvo su licenciatura en psicología en la Universidad McGill, donde estudió psicología fisiológica con Peter Milner. Posteriormente, trabajó como licenciado en la Universidad de Michigan bajo la dirección de James Olds, doctorándose en 1965. Routtenberg escribe: "El enorme interés de Olds en el significado biológico de la recompensa cerebral me convenció de que estos sustratos nerviosos desempeñan un papel fundamental en el comportamiento, particularmente en la memoria".

FREDERICK J. HOOVEN ("El sistema de control de vuelo de los hermanos Wright") es profesor de ingeniería en la Escuela Thayer de Ingeniería del Dartmouth College. Estudió aeronáutica e ingeniería mecánica en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Obtuvo su licenciatura en 1927 y a continuación trabajó para el laboratorio de investigación de la General Motors y para el Army Air Corps. Al no haber puestos de trabajo disponibles a principios de la década de 1930, emprendió por su cuenta el desarrollo de un radiogoniómetro para avión, que completó siendo vicepresidente e ingeniero jefe de la división de radio de la Bendix Aviation Corporation. De 1937 a 1956 trabajó como consultor independiente e inventor, y colaboró en el desarrollo de la primera máquina pulmón-corazón que tuvo éxito. En 1967, se incorporó a la Thayer School. Hooven tiene alrededor de 40 patentes de suspensiones de automóvil, sistemas de ignición de automóviles y aviones, sistemas radioeléctricos de navegación para aviones, tipografía fotoelectrónica, maquinaria controlada digitalmente e instrumentación.

Hace...

José M.ª López Piñero

...cuatrocientos años

Rodrigo Zamorano fue nombrado cosmógrafo encargado de la fabricación de instrumentos en la Casa de la Contratación de Sevilla. Más tarde, ocupó otros puestos, entre ellos el de piloto mayor y el de catedrático de cosmografía, convirtiéndose en la principal figura científica de la citada institución durante más de dos décadas.

La Casa de la Contratación había sido el centro en el que había cristalizado la náutica como disciplina a lo largo de los dos primeros tercios del siglo XVI. Además de cultivarse los estudios astronómicos y geográficos aplicados al arte de navegar, se había organizado en ella la formación científica regular de los pilotos, así como la construcción y una exigente revisión técnica de los instrumentos de observación y de las cartas de marear.

En la parte final de la centuria, la Casa ya no era la brillante institución que había servido de modelo en los demás países europeos, pero su actividad científica se mantenía aún a una altura notable. Zamorano, como cabeza de este período, participó en numerosas tareas técnicas. Fue, por ejemplo, el principal responsable de una revisión a fondo del "Padrón Real". Este último era un mapamundi depositado en la Casa y corregido periódicamente de acuerdo con las noticias de las nuevas expediciones, que servía de prototipo oficial para las cartas náuticas que reglamentariamente debían llevar los pilotos.

Por otro lado, Zamorano publicó varios libros, entre los que destaca un *Compendio de la arte de navegar* (1582), generalmente considerado como el título que cierra la serie de tratados clásicos de náutica de la España del siglo XVI. Alcanzó cinco reimpresiones castellanas en menos de veinte años. Aunque no tuvo tantas ediciones en idiomas extranjeros como los de Martín Cortés y Pedro Medina, fue traducido al inglés y publicado como apéndice de *Certaine errors of navigation* de Edward Wright, el texto de náutica más difundido en este idioma. Para la construcción de las tablas astronómicas, Zamorano utilizó la obra de Copérnico de una forma pragmática, dejando aparte la cuestión del heliocentrismo. Las tablas de declinación del Sol están corregidas, en su *Compendio*, conforme a los resultados de "Georgio Purbachio, Juan de Monte Regio, Wernero, Copérnico, Erasmo Reynoldo y otros muy diligentes y doctísimos matemáticos de nuestros tiempos; y como ellos, lo habemos también observado con instrumentos harto capaces aquí en Sevilla y otras partes". Ello le lleva a no "dar más crédito que conviene a las Tablas del Rey Don Alfonso el Sabio, cuya doctrina, puesto que al tiempo que él escribió fuese acertada, no lo paresce ahora a los que con cuidado consideran los movimientos y aparencias celestes".

...trescientos años

Juan Baustista Juanini publicó su *Discurso político, y phísico*, primera obra impresa en España que significó una completa ruptura con las doctrinas tradicionales en el terreno de las ciencias biomédicas y químicas. Era de origen milanés y había venido a España como médico de cámara del príncipe Juan José de Austria, prototipo de la nobleza "preilustrada", que se mostró activamente interesada en la introducción en España de las nuevas corrientes científicas.

Juanini era un seguidor del sistema iatroquímico, pero no se redujo a la reproducción servil de las doctrinas de Thomas Willis y de François dele Boe, Sylvius. Incorporó diferentes novedades, entre las que destaca la teoría del "espíritu nitroaéreo" de John Mayow, formulación antecesora del descubrimiento del oxígeno, de la que fue uno de los más tempranos defensores europeos.

El tema central del Discurso es el análisis químico del aire de Madrid, las enfermedades que sus impurezas producen y la manera de prevenirlas. Se ocupa también en esta obra de varios capítulos fisiológicos interpretados desde los supuestos modernos. Expone el funcionalismo digestivo de acuerdo con las ideas iatroquímicas, defiende la doctrina de la circulación de la sangre y explica los procesos respiratorios según la teoría del "espíritu nitroaéreo". Incluso ofrece un interesante resumen de fisiología vegetal, basado en las investigaciones de Jean Baptiste Du Hamel, Keneth Digby y Bernardus Swalwe. Paralelamente a las cuestiones fisiológicas, Juanini aplica las doctrinas iatroquímicas a diversos problemas patológicos y terapéuticos. Anotaremos únicamente la amplia exposición de la patogenia de la fiebre y del mecanismo de acción curativa de la quina. Se apoya asimismo en la anatomía normal y patológica, incluyendo noticias de su actividad de disector en diferentes anfiteatros anatómicos y hospitales españoles. La mayoría de las autopsias propias de las que ofrece un informe detallado son ilustraciones de problemas clínicos.

Juanini publicó posteriormente otros dos libros: unas *Cartas* (1691), consagradas a la anatomía, la fisiología y la patología del sistema nervioso, y *Nueva Idea Physica Natural* (1685), que es un ambicioso intento de explicación del mundo físico desde el sistema iatroquímico. El *Discurso* fue traducido al francés (1685) y su autor lo reeditó en castellano (1689), notablemente ampliado.

...doscientos años

Agustín de Betancourt y Molina comenzó sus estudios de matemáticas y de física en los Reales Estudios de San Isidro de Madrid. Posteriormente, amplió su formación en París y se convirtió en uno de los principales ingenieros españoles de la época. Desarrolló una intensa actividad como técnico, participando en el estudio del Canal de Aragón y en una amplia serie de proyectos hidráulicos. Ideó, entre otras cosas, una esclusa para canales de navegación que funcionaba con muy poca pérdida de agua, así como unas válvulas de cierre automático. Se ocupó, por otra parte, del drenaje de las minas. Estuvo encargado de resolver el problema en las minas de Almadén y fue comisionado para estudiar en Inglaterra las máquinas de vapor destinadas a este fin. También fue un adelantado de la telegrafía. Inventó un sistema de telégrafo óptico, que funcionó con éxito en una línea instalada desde Madrid hasta Cádiz, y ensayó otro a base de descargas eléctricas de una botella de Leyden.

Betancourt dirigió, primero, el Real Gabinete de Máquinas de Madrid (1788), para el que llegó a reunir cerca de medio millar de objetos, en gran parte modelos de maquinaria. Más tarde (1797), fue el

primer director de la Escuela de Puentes y Caminos de Madrid.

El año 1808 emigró a Rusia, país en el que residió hasta su muerte en 1824. En San Petersburgo, fundó y dirigió una escuela de ingeniería similar a la madrileña y ocupó elevados puestos oficiales. Construyó numerosas vías de comunicación e ideó varias máquinas, la más notable de las cuales fue una draga accionada a vapor con la que se limpió el puerto de Cronstadt.

La publicación más importante de Betancourt fue un *Essai sur la composition des machines* (1808), escrito en colaboración con José María Lanz. Utilizado como texto en la Escuela Politécnica de París, alcanzó una segunda edición, así como una traducción inglesa.

...cien años

Apareció la primera edición del *Tratado de histología normal y patológica* (1879) de Aureliano Maestre de San Juan. Desde su nombramiento como catedrático de anatomía en Granada (1860), Maestre se había consagrado a la histología, disciplina de la que llegó a ser el cultivador más destacado en el mundo académico oficial español con anterioridad a la obra de Santiago Ramón y Cajal. Su formación científica la adquirió principalmente con estancias en diferentes laboratorios de Francia, Alemania, Gran Bretaña y los Países Bajos. Su auténtico maestro fue Eloy Carlos Ordóñez, histólogo venezolano discípulo de Charles Robin, que residía en París. Ello explica la influencia que las ideas de la escuela histológica francesa ejercieron durante casi una década sobre Maestre, aunque más tarde asumió plenamente los supuestos de la escuela de Rudolf Virchow.

El prestigio científico de Maestre pesó de modo decisivo en la dotación en la Facultad de Medicina de la Universidad de Madrid de la primera cátedra de histología (1873) que funcionó en una institución española de carácter oficial. Nombrado titular de la misma, realizó desde ella una labor didáctica ejemplar, no solamente doctrinal sino, sobre todo, práctica. En su laboratorio, tomaron contacto con las técnicas histológicas numerosos médicos españoles, entre ellos el propio Cajal, que vio allí las primeras preparaciones microscópicas cuando cursó el doctorado (1877). Se formaron en él sus discípulos, algunos de los cuales continuaron la histología académica en la misma línea que su maestro, mientras que otros se dedicaron con preferencia a la histopatología.

Maestre fue también el fundador de la Sociedad Histológica Española (1874), asociación que logró integrar los esfuerzos de la inmensa mayoría de los cultivadores de la disciplina residentes entonces en Madrid. Publicó medio centenar de trabajos sobre temas relacionados con la anatomía microscópica.

El final de su vida parece simbolizar el carácter heroico de la dedicación científica en la sociedad española contemporánea. En 1888, un accidente en su laboratorio lo dejó ciego. Tras año y medio de duros padecimientos físicos y morales, murió pobre y casi olvidado.

...cincuenta años

Julio Palacios inició sus trabajos acerca de las estructuras cristalinas mediante la difracción de rayos X, en el Laboratorio de Investigaciones Físicas de Madrid, dirigido por Blas Cabrera. Palacios, que tenía entonces treinta y ocho años, era ya catedrático de termología en la Universidad de Madrid y había publicado anteriormente una memoria titulada *Los aspectos de rayos Roentgen, la constitución de los átomos y la estructura de los cristales* (1926). Se había formado en España con Esteban Terradas y el propio Blas Cabrera y, más tarde, junto a Kamerlingh Onnes en Leyden, pensionado por la Junta de Ampliación de Estudios. Desde su incorporación al Laboratorio de Cabrera hasta la guerra civil, su labor científica se centró fundamentalmente en investigaciones estructurales. Al crearse, en 1932, el Instituto Nacional de Física y Química, fue nombrado responsable de la sección de rayos X.

A partir de 1939, su actividad se extendió a campos muy diversos. Adscrito al Instituto de Oncología de Lisboa como jefe de su departamento de física –tarea que compartió con sus obligaciones en Madrid–, concedió notable atención a cuestiones de biofísica y de física médica. Entre los estudios que consagró a estos problemas, destacan quizá los relativos a la utilización terapéutica y diagnóstica de los ultrasonidos y los dedicados a la explicación de la miopía nocturna desde la perspectiva de la óptica. Se ocupó también de otros temas de física no relacionados con la biomedicina. En sus últimos años, llegó a obsesionarse con una crítica de la teoría de la relatividad que le condujo a unos resultados considerados, en general, muy discutibles.

Como investigador, Palacios fue autor de una amplia obra escrita, integrada principalmente por artículos aparecidos en revistas españolas y extranjeras. Por otra parte, publicó una serie de manuales destinados a la enseñanza universitaria y varias obras de divulgación que, en su mayoría, alcanzaron una amplia difusión.

Energía de fusión con haces de partículas

En un nuevo planteamiento de la fusión controlada se hace implosionar un gránulo de combustible mediante una fuente externa de energía. Ese método, emprendido en USA y la URSS, proporciona energía mediante haces intensos de partículas

Gerold Yonas

La fusión, tipo de reacción nuclear que convierte la masa en energía dentro del sol y otras estrellas, se contempla hoy por casi todo el mundo como uno de los medios más prometedores de generar energía eléctrica a lo largo del próximo siglo y en adelante. La investigación en esta área se ha intensificado vigorosamente desde el embargo del petróleo en 1973; como resultado de este esfuerzo generalizado, se han realizado progresos sustanciales. Muchos especialistas opinan que la viabilidad científica de la energía de fusión se establecerá en la próxima década. El período aquí es determinante, pues varios de los principales experimentos de "demostración del principio" deberán completarse en los años 80.

Los esfuerzos para repetir el proceso de fusión de manera controlada se han centrado principalmente en los esquemas de confinamiento magnético, en los que el combustible gaseoso caliente (una mezcla de deuterio y tritio, dos isótopos pesados del hidrógeno) se mantendrá dentro de la vasija del reactor mediante fuertes campos magnéticos, y, en menor escala, en un esquema de confinamiento inercial, que se basa en potentes haces láser que implosionan pequeños gránulos ("pellets") de deuterio y tritio. En los últimos años, mis colegas y yo en los Sandia Laboratories en Albuquerque, Nuevo México, y otro grupo mayor de investigadores en el Instituto de Energía Atómica I. V. Kurchatov de Moscú hemos emprendido un método distinto de la fusión por confinamiento inercial. En vez de haces láser hemos empleado haces intensos de electrones (y más recientemente de iones) generados por pulsos eléctricos de intensidad y voltaje muy elevados.

Este planteamiento por implosión de gránulos de combustible es, en potencia, eficaz, sencillo y económicamente rentable; pero, como todas las demás aproximaciones al proceso de la fusión, requiere dar soluciones a una serie de problemas técnicos de enorme complejidad. Podemos, sin embargo, anunciar avances esperanzadores en nuestros esfuerzos. De ahí que este caballo desconocido en la carrera de la energía de fusión esté atrayendo un interés creciente. Y es verosímil que el ganador en esta competición mundial logre, además de la demostración de su viabilidad científica, los primeros reactores experimentales y, por tanto (quizás al principio del próximo siglo), la realización de una planta de energía.

La idea de fusionar los núcleos de los átomos de hidrógeno con el fin de liberar energía para la obtención de electricidad resulta atractiva por varias razones. Puede obtenerse una medida del rendimiento potencial de la fusión controlada si se considera que un dedal lleno de hidrógeno pesado licuado liberaría la misma energía (en forma de neutrones energéticos) que 20 toneladas de carbón. Más importante todavía, el combustible puede conseguirse fácilmente. El deuterio se encuentra en todas las aguas naturales y el tritio puede sintetizarse por reacción de los neutrones generados en la fusión con litio situado en una "manta" alrededor de la cámara de reacción. Si se seleccionasen cuidadosamente los materiales de las paredes de la cámara de reacción, el reactor de fusión desecharía menos subproductos radiactivos que un reactor de fisión. Además, no habría posibilidad de que la masa de combustible se fundiera, un supuesto fallo que ha ayudado a hacer de las plantas de energía nuclear blanco de controversias.

La naturaleza tiene formas de acoplar el riesgo y la recompensa; y así, con frecuencia, aquellos procesos que ostentan la mayor posibilidad de beneficiar a la humanidad son, a la vez, aquellos que más cuestan de alcanzar. Eso es lo que sucede con la fusión. Después de unos treinta años de intenso trabajo, la ignición de la fusión (es decir, la combustión eficiente del deuterio y el tritio) se ha logrado de una única manera: la bomba de hidrógeno. Además, la fusión se consiguió en este caso sólo con un detonante de fisión (una bomba atómica), a fin de lograr la temperatura sumamente alta y el grado de confinamiento necesarios para que los núcleos de hidrógeno se fusionen.

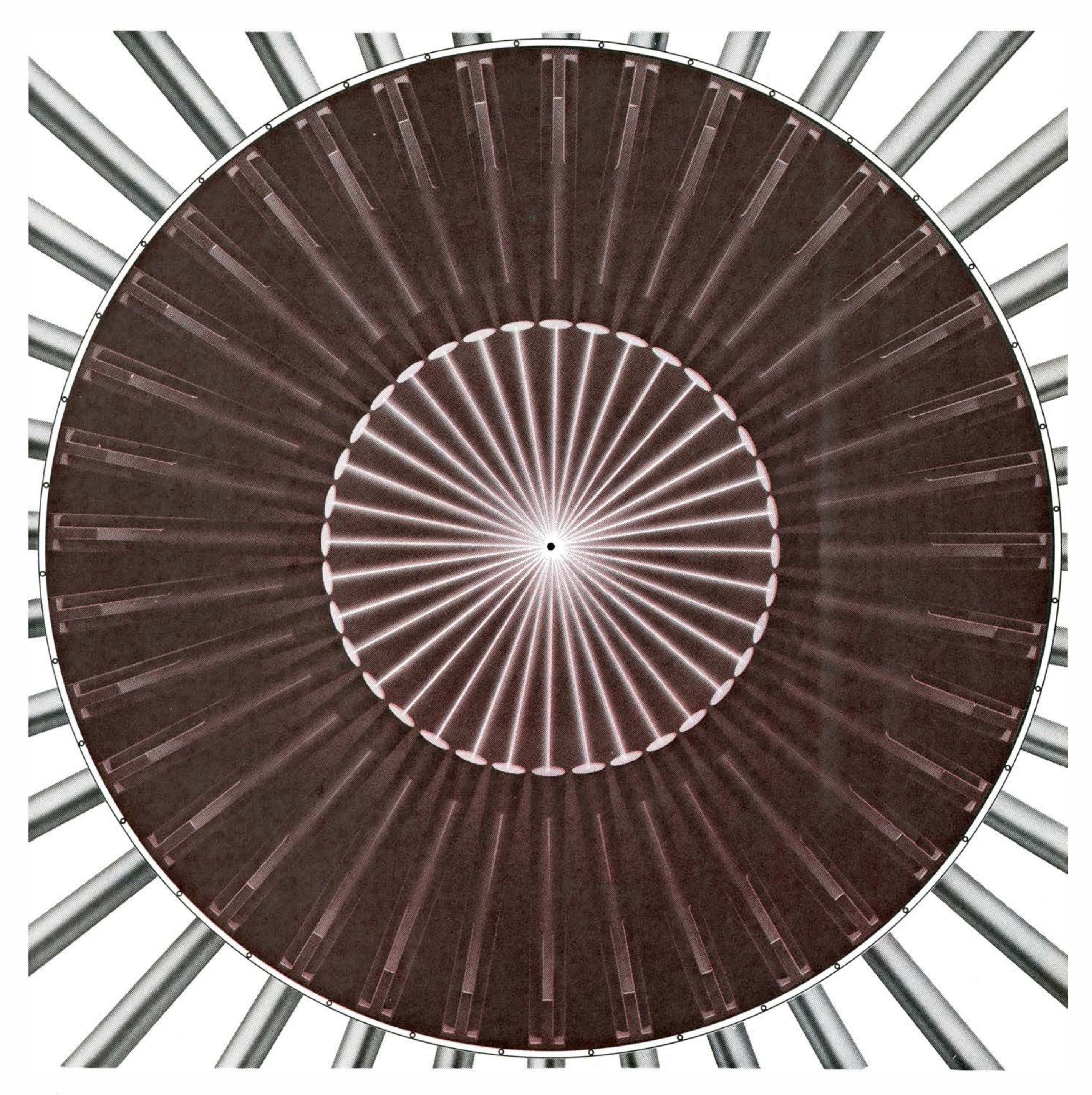
Las condiciones requeridas para lograr un rendimiento apreciable de los reactores de fusión de deuterio y tritio son excepcionales: temperatura de unos 100 millones de grados Celsius y una combinación del tiempo de confinamiento del combustible (en segundos) y de la densidad del mismo (en partículas por centímetro cúbico) cuyo producto sea mayor que 10^{14}. Tan alta temperatura se necesita para llevar los núcleos a velocidades suficientes para vencer su mutua repulsión eléctrica cuando se aproximan uno a otro. El tiempo de confinamiento y la densidad de partículas requeridos aseguran que se produzcan suficientes colisiones para que las reacciones ocurran de un modo eficiente.

En el método del confinamiento magnético, el combustible debe mantenerse a una densidad relativamente baja en virtud de los límites prácticos de las intensidades de campo magnético que pueden obtenerse. En consecuencia hay que alcanzar tiempos de confinamiento de segundos o minutos para conseguir un quemado sustancial del combustible. En el método o aproximación inercial, el combustible se calienta a medida que se va comprimiendo hasta una elevada densidad (típicamente 1000 veces la densidad normal del combustible sólido). Bajo estas condiciones, el combustible reacciona con tal rapidez que la combustión es, en realidad, una pequeña explosión. Como el combustible comprimido está sujeto a su inercia, se quema antes de esparcirse (en menos de una mil millonésima de segundo).

Al haber aumentado mucho el coste de la investigación de la fusión, han surgido razonables objeciones no sólo sobre los

beneficios potenciales de la fusión sino también sobre sus posibles limitaciones. Uno de los puntos cruciales de debate es que, aun cuando se resuelvan los problemas físicos y se desarrollen adecuadamente las tecnologías necesarias, la complejidad, las exigencias de los materiales y el coste total están a tiempo de obstruir la consecución de una nueva fuente de energía. Las empresas eléctricas han expresado su deseo de experimentos de muestras baratos, que puedan ponerse en rápido funcionamiento y sean susceptibles de fácil modificación una vez corroborado su éxito. El método de la fusión por confinamiento inercial puede cumplir esta exigencia con más facilidad porque no necesita de los grandes imanes superconductores ni de otros complejos y costosos sistemas que se precisan en el caso de la fusión por confinamiento magnético; por el contrario, intenta lograr el confinamiento dirigiendo una fuente de energía intensa (un haz láser o un haz de partículas) contra la superficie exterior de un gránulo esférico, provocando una ignición de la superficie (ablación), como en un cohete, y una implosión de la mezcla combustible de deuterio y tritio en el resto del gránulo. La compresión, además de calentar el combustible hasta la temperatura de ignición, aumenta también la cantidad de combustible que puede quemarse.

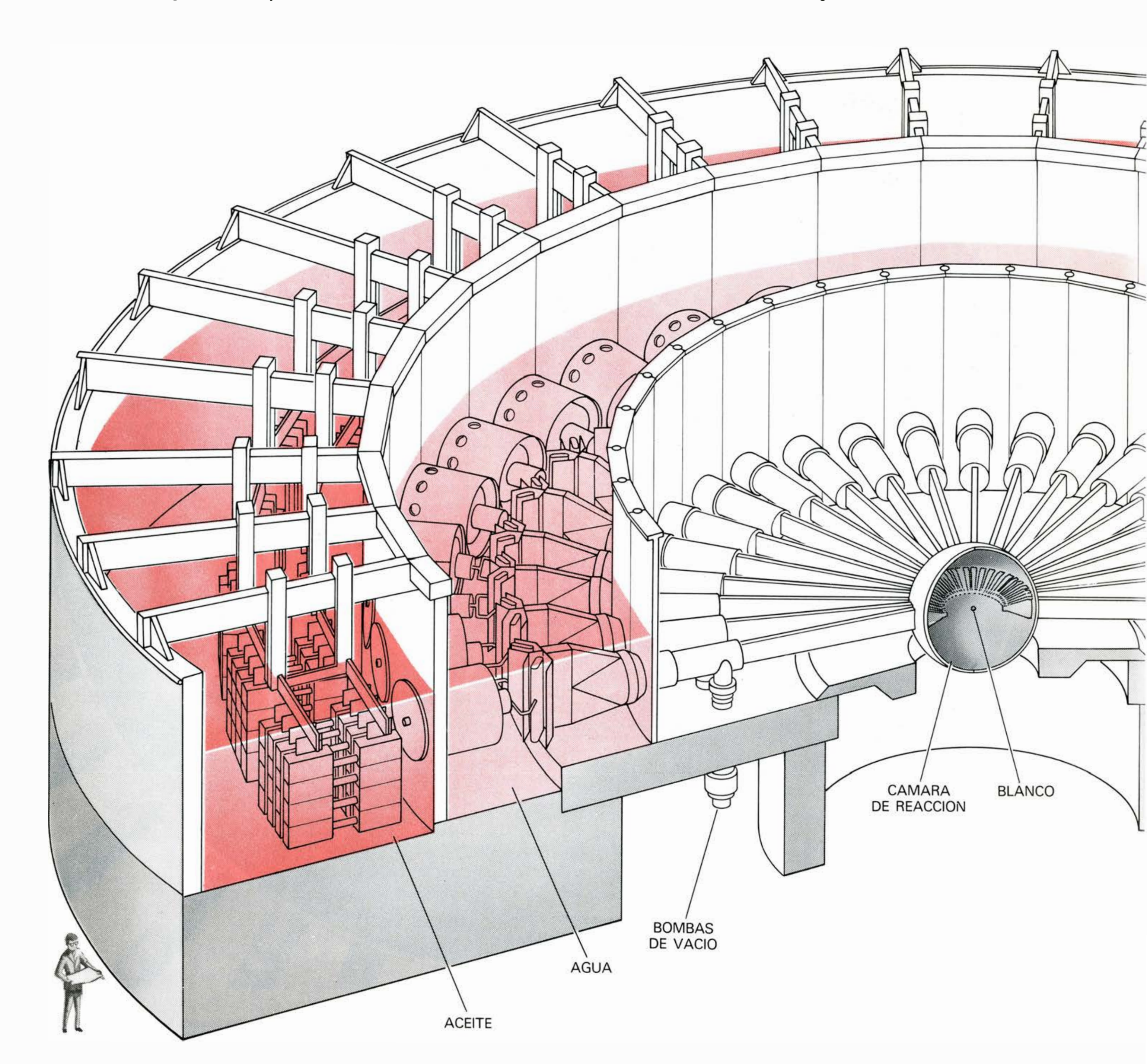
La fusión por confinamiento magnético puede compararse con un horno, que exige ignición, realimentación y extracción



TREINTA Y SEIS HACES DE ELECTRONES se concentrarán para implosionar un gránulo de combustible de deuterio-tritio en el acelerador de fusión por haz de electrones experimental, que se está construyendo en los Sandia Laboratories. Este dibujo muestra una sección horizontal de la cámara de reacción, que tendrá un radio de 106,6 centímetros. Los haces de electrones (*líneas brillantes*) se inyectarán en la cámara desde los extremos de 36 líneas de acelerador independientes y se propagarán en los últimos 45,7 centímetros hasta el blanco por unos canales de plasma magnetizados (*color*), formados en el aire del interior de la cámara. Cuando el aparato esté acabado y a punto de prueba, a fines de este año, se espera que proporcione pulsos de electrones con una potencia total de 30 billones de watt a la zona del blanco; una ampliación planificada puede doblar el nivel de potencia en el año 1983. Los experimentos de ignición de gránulos están programados para 1985. El acelerador podrá adaptarse para producir haces de iones pulsantes en la investigación de la fusión.

de impurezas y que tiene un tiempo de combustión largo con respecto al tiempo de ignición. La fusión por confinamiento inercial, por otro lado, exige un sistema de ignición eficiente y altamente repetitivo y un suministro continuado de gránulos de fuel baratos que se inyectan y se encienden de uno en uno. En un hipotético reactor de confinamiento inercial se quemaría una diez milésima de gramo de combustible cada décima de segundo por un pulso de 100 billones de watt, con una producción térmica media de 1000 millones de watt. (Una chispa de una bujía de automóvil común proporciona 100 watt a su cámara de combustión.) Si se emplea un ciclo clásico de conversión térmico a eléctrico, y el sistema de ignición tiene un rendimiento del 20 por ciento, una planta de energía con un reactor de fusión por confinamiento inercial proporcionaría 350 millones de watt de electricidad, los suficientes para suministrar energía a una ciudad de 175.000 habitantes. (Debe tenerse en cuenta que la cifra de 100 billones de watt, citada aquí, es la potencia máxima de un pulso cuya potencia media sea sólo de unos 20 millones de watt.)

Los láseres son, en muchos aspectos, ideales para irradiar tales gránulos. Estos dispositivos pueden proporcionar pulsos de radiación extremadamente cortos (que duran una mil millonésima de segundo o menos), que pueden focalizarse, sin dificultades, sobre la superficie de un gránulo desde lejos con la ayuda de lentes o espejos. En los últimos años se ha logrado un progreso significativo en la investigación de la fusión por láser y están desarrollándose grandes láseres de cristal de neodimio y dióxido de carbono en el Departamento de Energía de Estados Unidos con el fin

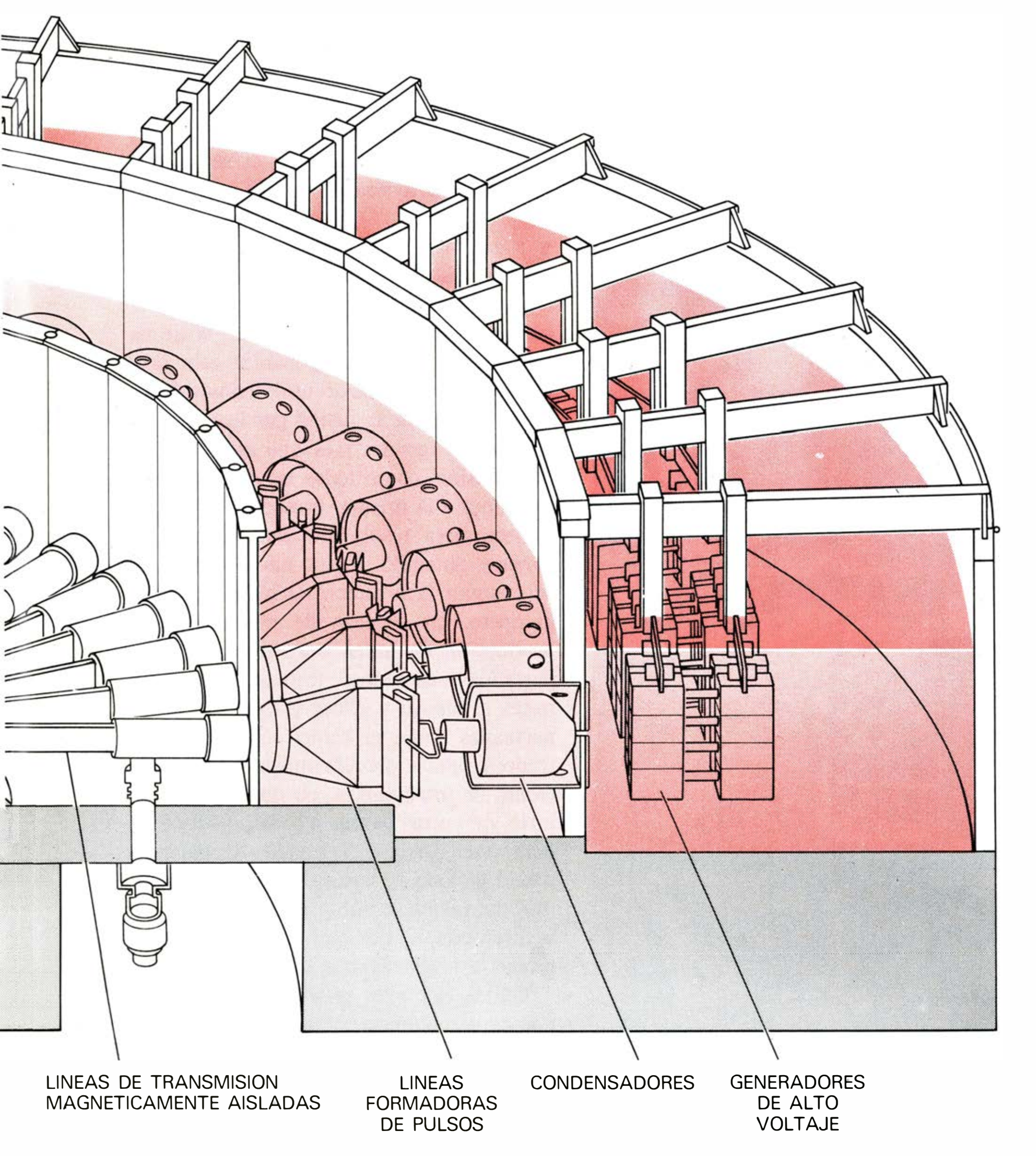


CORTE EN SECCION, en estas dos páginas, que muestra el último diseño del acelerador de fusión por haz de electrones de Sandia. La cámara de reacción es el contenedor esférico del centro. Las 36 líneas de transmisión magnéticamente aisladas que conducen a su interior tienen una longitud de unos 6,6 metros cada una. Los haces de electrones consistirán en pulsos de elevada intensidad constituidos por descargas eléctricas de un anillo de 36 pares de líneas formadoras de pulsos cargadas por condensadores (*dispositivos en forma de barril*). Cuando el acelerador funcione, los condensadores y las líneas formadoras de pulsos esta-

de demostrar las condiciones de "rentabilidad" de la fusión antes de 1985.

Pero los láseres tienen dos serias desventajas: su ineficacia y su tendencia a la carestía. Así, por ejemplo, los láseres de cristal de neodimio, los láseres de alta potencia más corrientes, tienen una eficacia de sólo 0,2 por ciento y su costo por unidad de energía es normalmente de 500 dólares por joule. La máxima eficacia de los láseres de dióxido de carbono se estima que está entre el 5 y el 10 por ciento. Situándose la de los modelos actuales entre el 2 y el 3 por ciento. Existen fuertes discrepancias sobre la longitud de onda ideal para un láser de fusión y se ha emprendido una profunda investigación para desarrollar láseres eficaces de corta longitud de onda. Esa ineficacia de los láseres constituyó, por encima de cualquier otro considerando, el motivo de que el centro de interés se desplazara en nuestros días hacia los haces de electrones o iones como encendedores de los gránulos.

El intento de fusión mediante haces de partículas ha sido posible merced al desarrollo de la tecnología de la potencia pulsante, iniciada a mediados de la década de los 60. Dicha tecnología fue apoyada por la Comisión de Energía Atómica y el Departamento de Defensa norteamericano para proporcionar fuentes de radiación encaminadas a probar la resistencia de los misiles balísticos intercontinentales ante chorros de radiación de cabezas antimisiles balísticos. Para simular estos efectos de la radiación se necesitaban potentes chorros de rayos X. La radiación producida cuando un haz de electrones de muchos millones de volt choca contra una lámina delgada de un metal como el tantalio era adecuada para este propósito. Al objeto de subvenir a esta necesidad de rayos X y rayos gamma intensos, Thomas H. Martin y su grupo de Sandia, con la ayuda de J. C. Martin, del British Atomic Weapons Research Establishment, desarrollaron, en 1967, un acelerador de haces de electrones capaz de descargar una energía máxima de 100.000 joule en un tubo de rayos X a un potencial eléctrico de 10 millones de volt. Este acelerador de billones de watt, llamado Hermes, y un aparato similar desarrollado por el Departamento de Defensa norteamericano englobaba muchos de los componentes e ideas que se aplican hoy día en los aceleradores de haces de electrones pulsantes.



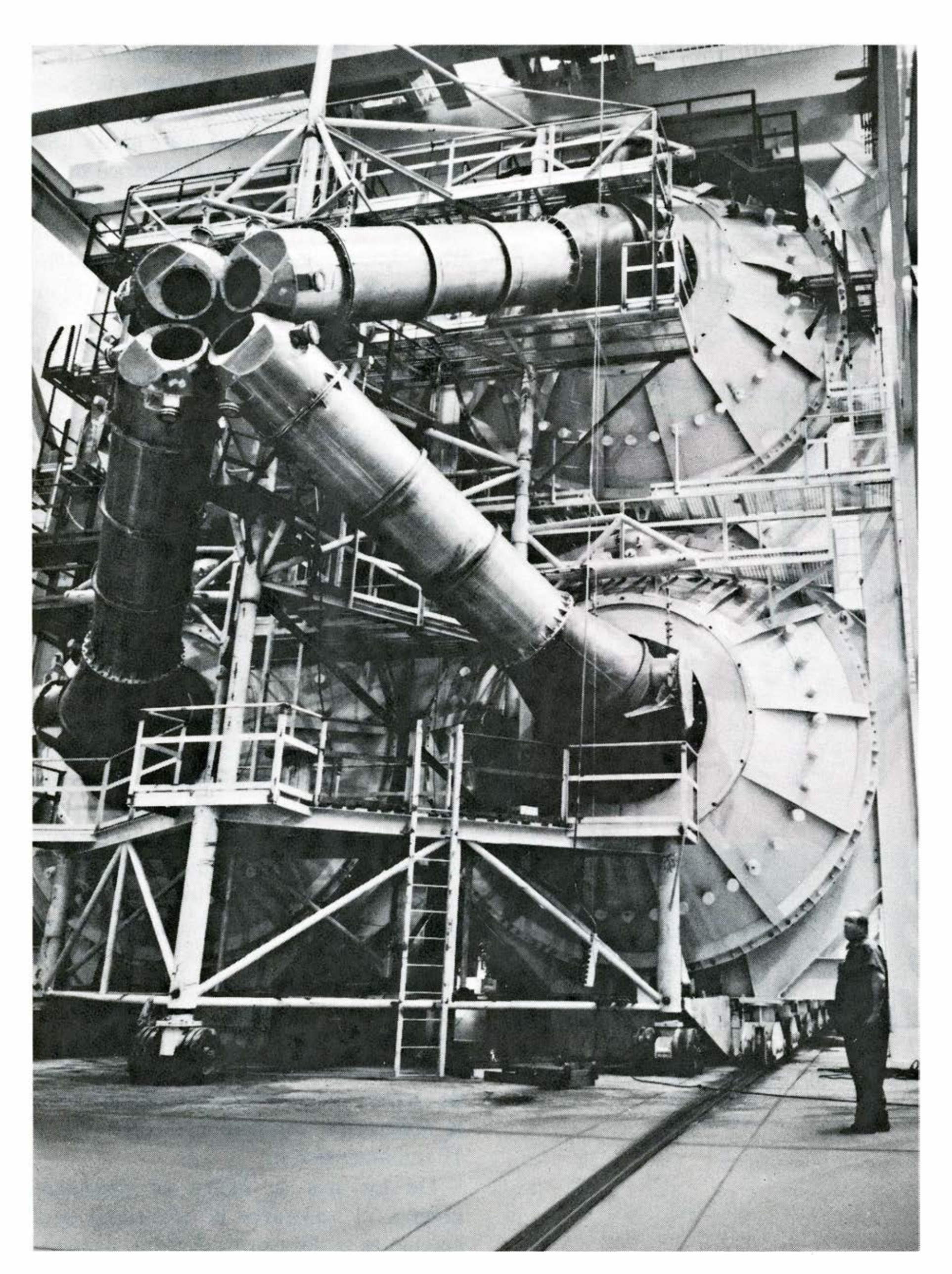
rán sumergidos en un dieléctrico líquido, en este caso agua pura (*coloración suave*). La electricidad almacenada vendrá suministrada por un anillo más exterior de generadores de alto voltaje, que a su vez estarán aislados por aceite de transformador (*coloración intensa*). La energía total suministrada a la zona del blanco será del orden del millón de joule. La URSS tiene proyectada otra máquina experimental un poco mayor.

Un acelerador de haces de electrones de alta energía es un dispositivo extraordinariamente sencillo, cuyos componentes pueden comprarse en cualquier tienda o fabricarse en un taller ordinario. Viene a consistir en una fuente de alto voltaje que almacena energía en condensadores y después la descarga a través de conmutadores en una línea formadora de pulsos aislada y, a partir de allí, en un diodo o tubo de vacío de dos elementos. Los electrones acelerados hacia el ánodo del tubo proceden de un plasma denso (un gas de partículas cargadas supercalentado), que se forma en la superficie metálica del cátodo como resultado del calentamiento autorresistivo de los impactos microscópicos de la superficie. Se acepta generalmente que la potencia necesaria para la ignición de un gránulo es de 100 billones de watt. Para que un haz de electrones libere esta potencia hay que trabajar con una corriente de entre 10 y 100 millones de amperé, lo que precisa un potencial para la aceleración comprendido entre uno y 10 millones de volt.

De los que se hallan en funcionamiento, el acelerador de electrones más potente es el dispositivo Aurora, desarrollado para el Departamento de Defensa norteamericano por Ian D. Smith y sus colegas de la Physics International Company e instalado en el Army's Harry Diamond Laboratory cerca de Washington D.C., en 1972. Este acelerador de cuatro

haces y de 20 billones de vatios trabaja a un potencial eléctrico de más de 10 millones de volt y genera pulsos que duran más de 100 mil millonésimas de segundo. Aunque no tiene los parámetros adecuados para experimentos de fusión provocada por haz de electrones, su notable rendimiento (50 por ciento) y su costo relativamente bajo (14,5 millones de dólares) proporcionan una impresionante demostración de la tecnología de la potencia pulsante.

No se habían expresado aún estos criterios de rendimiento y costo de los encendedores de fusión por haz de partículas cuando la primera propuesta para su uso en la fusión por confinamiento inercial, presentada por A. John Gale, de la High Voltage Engineering Corporation, ganó una patente en los Estados Unidos en 1963. Gale fue, quizás, el primero en proponer la fusión por confinamiento inercial dirigido por haces, ya que los láseres acababan de inventarse por el tiempo en que él presentó su petición de patente, en 1960. Poco después, F. Winterberg, del Case Institute of Technology, estudió la aceleración hipersónica de pequeños granos de materia para alcanzar condiciones de ignición de la fusión en el impacto. Hacia 1967, sin embargo, Winterberg observó que podían producirse haces muy potentes de electrones o iones de una forma más sencilla. Entre 1964 y 1967, Franklin C. Ford y su grupo de la Physics International se dedicaron también a investigar el método la ignición de gránulos por haz de electrones a lo largo de su trabajo pionero sobre tecnología de potencia pulsante en escala hasta valores de 100 mil millones de watt. Según L. I. Rudakov, inaugurador del programa ruso de haz de electrones, E. A. Zavoiski, del Instituto Kurchatov, también había decidido en 1968 seguir el enfoque del haz de electrones. Si bien la primera propuesta rusa no apareció hasta 1971. No obstante ese interés generalizado, hubo que acometer demostraciones de la capacidad de desarrollar la tecnología a otras escalas y pruebas de mejora de la focalización del haz (realizadas en Sandia y en otros laboratorios en los primeros años de la década de los 70) para que se catalizara un esfuerzo que condujo a la ayuda de la AEC en 1973.



"AURORA", el acelerador de electrones de mayor potencia existente en la actualidad. Construido por la Physics International Company para el Departamento de Defensa norteamericano, tiene por misión probar la supervivencia de los misiles balísticos intercontinentales frente a chorros de radiación simulados, provenientes de cabezas antimisiles. El aparato, de cuatro haces y 20 billones de watt, fue fotografiado en el Army's Harry Diamond Laboratory. El acelerador funciona a un potencial eléctrico de más de 10 millones de volt y genera pulsos de electrones que duran 100 mil millonésimas de segundo. Aunque el Aurora no es adecuado para experimentos de fusión, demuestra la capacidad de la tecnología de la potencia pulsante.

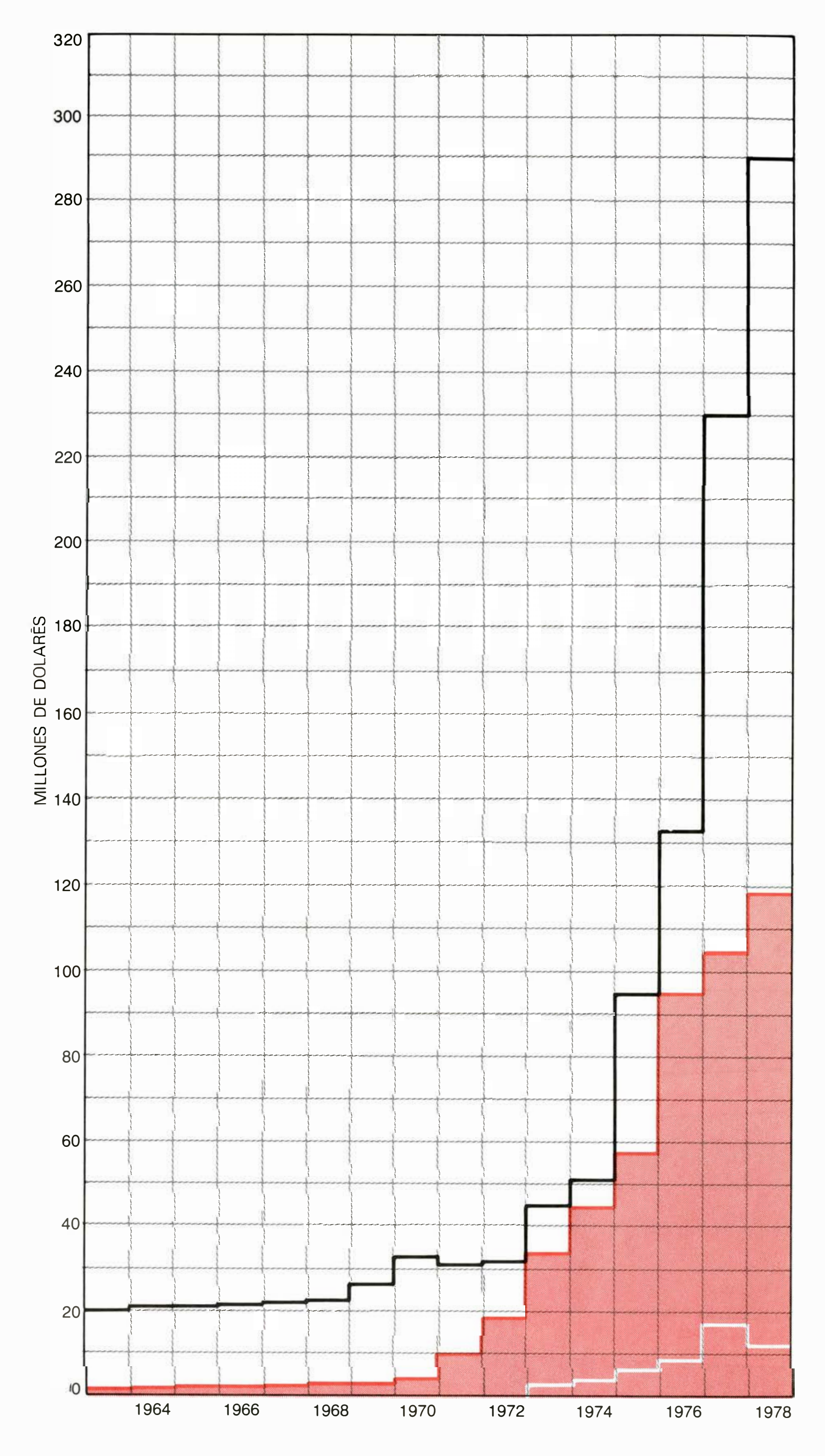
Vista la eficacia, sencillez y bajo coste de los aceleradores de haces de electrones de alta energía (el coste se estima aún hoy en un 2 por ciento del coste de láseres de energía parangonable), cabe preguntarse por qué tardó tanto en admitirse la posibilidad de la fusión por haz de electrones. La respuesta es que este enfoque de la fusión, como todas las otras aproximaciones a la misma, presenta problemas básicos cuya resolución dista mucho de haberse obtenido. Entre estos problemas se cuentan la creación de pulsos de megampère, en decenas de nanosegundos, producción de haces muy focalizados de partículas cargadas, transporte de los haces al blanco y eficaz colocación de las partículas sobre el blanco. Se han registrado, empero, descubrimientos e innovaciones de importancia, en nuestro laboratorio y en otras partes, a lo largo del corto tiempo en que se ha venido trabajando con el método de haces de electrones; además, la misma tecnología ha mostrado ser suficientemente flexible y barata para acomodarse y beneficiarse de estos avances.

Quizás el mayor progreso haya consistido en una comprensión más profunda de la naturaleza de los haces y de cómo focalizarlos. Los electrones, por ser partículas cargadas, se repelen entre sí; hacen, pues, de la focalización un problema mucho más difícil que en el caso de los fotones de los láseres. El obstáculo puede superarse sólo utilizando el efecto de "autopinzado" ("self pinching") del campo magnético generado por un haz de elevada intensidad cuando se neutraliza la fuerza eléctrica de repulsión. En un diodo de alta intensidad, las superficies metálicas próximas reducen la fuerza eléctrica, y el campo magnético del haz dirige los electrones hacia el eje del

diodo. Después de moverse radialmente, los electrones se focalizan sobre el ánodo en el eje donde el campo magnético se anula. Este fenómeno, que fue estudiado experimentalmente por vez primera por Philip W. Spence y yo mismo en la Physics International en 1967 y 1968, ha recibido una explicación más detallada por parte de James W. Poukey, de Sandia. Este desarrolló un modelo por computador en el que se simula el movimiento de billones de electrones cuando están contenidos dentro de un diodo. S. A. Goldstein, del Naval Research Laboratory, ha dado explicaciones análogas y ha construido modelos del comportamiento del diodo por medio de métodos analíticos sencillos.

Se sabe ya que el efecto de autofocalización está muy condicionado por el flujo de iones provenientes del plasma que se forma en el ánodo. Este flujo de iones gobierna la dinámica de la compresión (pinzado) del haz. En Sandia pudimos ampliar el pinzamiento del haz, en 1973, por explosión previa de un fino alambre situado a lo largo del eje del diodo, proporcionando así una fuente adicional de plasma. Hoy día se puede producir un haz denso de electrones con un diámetro de dos milímetros mediante técnicas pasivas de formación de plasmas. Las mayores densidades de potencia que se han logrado hasta ahora con tales diodos se han producido en el Instituto Kurchatov; Rudakov ha informado sobre una densidad de potencia de más de 10^{13} watt por centímetro cuadrado. Diodos de haz de electrones de alta potencia han trabajado eficazmente hasta corrientes del orden del millón de ampère, y parece que deberían funcionar simultáneamente poco menos de 100 diodos para crear la potencia total necesaria para la ignición de un gránulo. La investigación de la focalización del haz ha aportado también indicios de que un haz de electrones de elevada intensidad se comporta más como un gas que como un grupo de partículas que siguen trayectorias paralelas en su camino hacia el gránulo. El movimiento aleatorio de los electrones dentro del haz permite que toda la superficie de un gránulo esférico quede uniformemente bañada cuando se irradia el gránulo con un solo haz. Y este método de irradiación por un haz único fue el empleado en nuestro primer experimento fructífero de producción de neutrones.

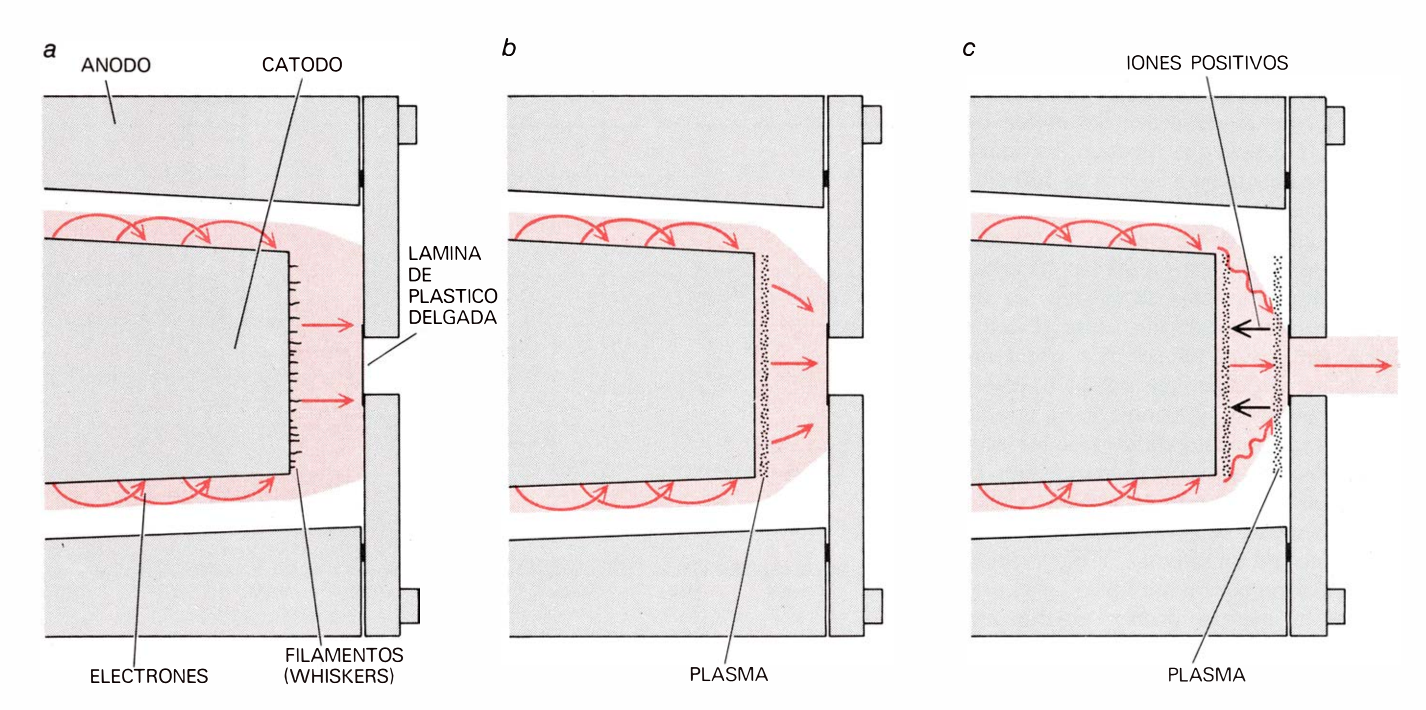
Además de consignar esos avances en la focalización del haz, se han ido resolviendo los problemas tecnológicos de formación de pulsos, en los últimos cinco años, gracias al desarrollo de interruptores o conmutadores de alta potencia y de una mayor comprensión de la interrupción eléctrica. Hasta ahora, hemos podido co-



PRESUPUESTOS ANUALES para investigación en las distintas clases de potencia de fusión en Estados Unidos. El presupuesto para investigación sobre la fusión por confinamiento magnético (*línea negra*) permaneció prácticamente constante desde 1958 hasta 1974, fecha en que registró un rápido aumento hasta el valor actual de unos 300 millones de dólares por año. El presupuesto para el programa de fusión por confinamiento inercial (*línea de color*) empezó a aumentar en 1971. Dos años más tarde, en 1973, alcanzó un nivel comparable al del programa de confinamiento magnético. Durante el ejercicio de 1978, la investigación sobre la fusión por confinamiento inercial (que comprende la técnica de láser y la técnica de haz de partículas) representaba alrededor de un 30 por ciento del presupuesto total que los Estados Unidos, destinan a financiar la investigación de la fusión. La fracción del presupuesto para el confinamiento inercial que correspondía a la investigación por haces de partículas (*línea blanca*) era menos del 3 por ciento del gasto.

ANODO CATODO CAMPO MAGNETICO ELECTRONES ANODO CATODO

LINEA DE TRANSMISION, magnéticamente aislada, que llevará los pulsos de cada haz de electrones hasta la cámara de reacción en el nuevo acelerador de fusión por haz de electrones de Sandia Laboratories (Albuquerque, estado de Nuevo México). En este par de diagramas, el flujo de electrones, del orden del megampère, está representado en color; la diferente intensidad del color corresponde a la concentración de electrones en las distintas partes del pulso. A medida que el pulso baja hacia el cátodo central de la línea de transmisión, produce un campo magnético transversal (*flechas negras*) que inhibe la disrupción eléctrica del espacio vacío que separa el cátodo del ánodo envolvente. Delante del pulso, los electrones (*flechas de color*) tienden a escaparse del cátodo al ánodo, perdiéndose energía. En el interior el campo magnético autogenerado obliga al flujo de electrones a quedarse en la superficie del cátodo.



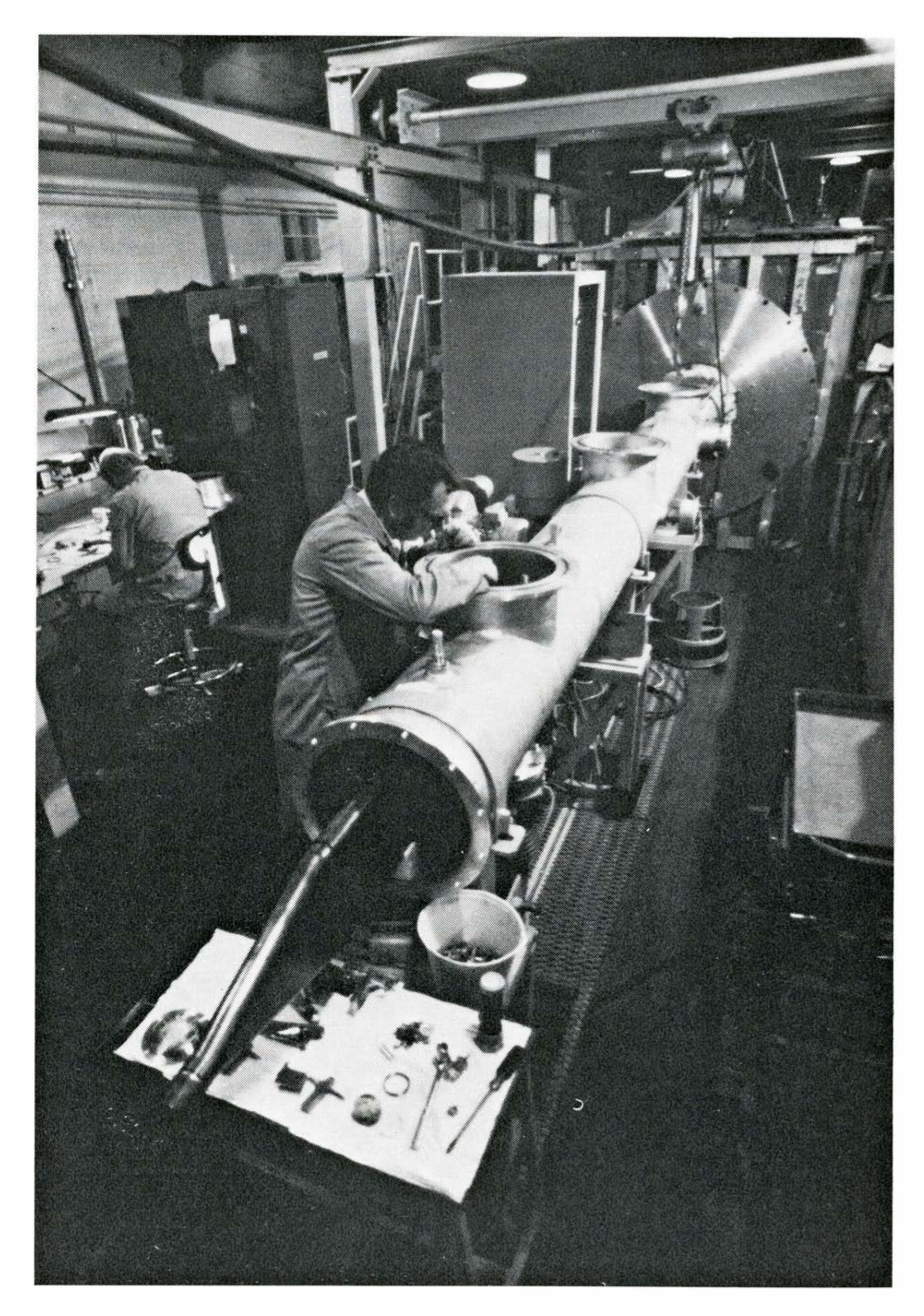
EL EFECTO DE AUTOFOCO permitirá a los electrones que fluyen a lo largo del cátodo de una línea de transmisión magnéticamente aislada focalizarse sobre el ánodo en el eje donde el campo magnético se anula. El efecto está muy condicionado por la formación de una película de plasma (*punteado negro*) sobre la superficie del cátodo y el ánodo. Inicialmente los electrones son emitidos por unas protuberancias microscópicas superficiales ("filamentos" o "whiskers") del cátodo y se aceleran hacia el ánodo en forma de un haz relativamente desenfocado (*a*). La explosión de los "filamentos" calentados forma un plasma (un gas caliente de partículas cargadas) sobre la superficie del cátodo, intensificando el flujo de electrones a través del intervalo entre el cátodo y el ánodo. El flujo de electrones calienta la superficie del ánodo, y forma allí otra película de plasma (*b*). El flujo inverso de iones cargados positivamente (*flechas negras*), desde el plasma del ánodo al plasma del cátodo, ayuda a neutralizar la fuerza autorrepulsiva de los electrones, aumentando así la focalización del haz de electrones a medida que pasa hacia la cámara de reacción a través de un pequeño agujero en la superficie del ánodo (*c*). (Dibujos de George V. Kelvin.)

nectar pulsos de hasta ocho billones de watt con una duración de 24 nanosegundos. Los actuales diseños de blancos para los haces de partículas parecen indicar que probablemente no serán necesarios pulsos más cortos. En 1974 se logró un método de interrupción rápida de alto voltaje en un dieléctrico de aceite por Kenneth R. Prestwich, de nuestro laboratorio, con interruptores de disparo guiado, que se fundan en un modelo conceptual desarrollado por J. C. Martin. Con esta técnica se han conectado unas potencias totales de hasta un billón de watt.

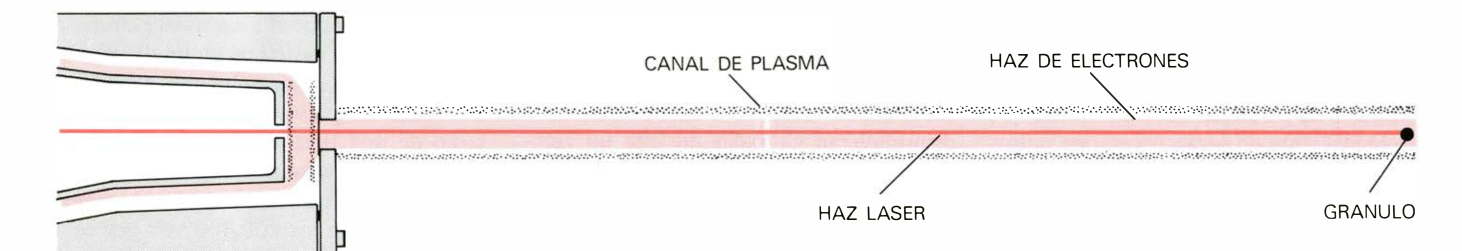
Cuando hubo que aumentar la densidad de energía eléctrica en el circuito, se sustituyó el dieléctrico de aceite por agua y se instauró una técnica distinta de conmutación. (El agua pura es un aislante excelente para períodos de uno o dos microsegundos: tiene una constante dieléctrica 81 veces mayor que la del vacío, y debe compararse con la del aceite, cuya constante dieléctrica es sólo tres veces la del vacío.) En un dieléctrico de agua fue necesario un nuevo interruptor porque, al ser más cortas las líneas de transmisión de alta densidad de energía, había menos espacio para un interruptor de disparo. El problema se resolvió con un interruptor autodisparado, al que una línea adicional de formación de pulsos proporcionaba un aumento de voltaje lo suficientemente corto para crear múltiples interrupciones y numerosos canales portadores de corriente en el agua. Este tipo de interruptor se ha venido empleando en un sistema que produce un pulso de cinco millones de ampère, que alcanza su máximo en menos de 20 mil millonésimas de segundo.

Aunque la tecnología de transferir pulsos de alta energía a través de dieléctricos líquidos ha evolucionado rápidamente, la concentración espacial del pulso ha constituido un problema de resolución difícil debido a la interrupción eléctrica en el propio acelerador. El punto más débil en el proceso de compresión de potencia ha sido la interfase sólida aislante entre la línea de formación de pulso aislada por agua y la cámara del diodo que contiene el gránulo de combustible. La interfase, hecha de plástico, puede soportar en general un campo de 100.000 volt por centímetro; por tanto, sólo puede soportar 25 millones de watt por centímetro cuadrado en su superficie. Esta restricción significa que los 100 billones de watt necesarios para un reactor de fusión precisarían una interfase con un área de cuatro millones de centímetros cuadrados. Si se disminuye el tiempo de crecimiento del pulso, la densidad de potencia puede aumentarse todavía hasta cerca de 100 billones de watt por centímetro cuadrado; sin embargo, el suministrar la potencia necesaria a través de un módulo único presentaría muchas dificultades prácticas y precisaría, en resumen, que los haces de muy alta intensidad disminuyeran su radio durante un recorrido de muchos metros.

Como resultado de un trabajo de la Physics International, el Instituto Kurchatov y los Sandia se ha podido demostrar una solución al problema de la concentración de energía. El método utiliza líneas de transmisión magnéticamente aisladas, idea que se basa en que el aislamiento eléctrico es mayor en el vacío que en un dieléctrico líquido o sólido. Normalmente, cuando se transfiere un pulso de baja potencia a lo largo de una línea de transmisión vacía, los electrones se emiten desde el electrodo cargado negativamente cuando el campo eléctrico supera los 200.000 volt por centímetro. Bajo estas condiciones, se pierde mucha energía en una corta distancia, en vez de transmitirse a lo largo de la línea en forma de onda electromagnética. A



MODULO PROTOTIPO del acelerador de fusión por haz de electrones de 36 módulos, que se está ensayando en Sandia. La línea de prueba magnéticamente aislada, que se ve aquí desmontada en parte, es alimentada por un pulso de electrones proveniente de dos líneas formadoras de pulso compactas aisladas por agua (*ocultas detrás de la gran placa circular posterior*). La propia línea de prueba consiste en tres placas paralelas (un cátodo central flanqueado por dos ánodos), cerradas en una cámara de vacío cilíndrica. En una prueba reciente, los electrones se transmitieron a lo largo de la línea a potencias de 800 millones de watt con un rendimiento de casi el 100 por ciento. El objetivo que rige estos experimentos estriba en producir un haz de electrones focalizado con una densidad de potencia de 10 billones de watt por centímetro cuadrado.



PROPAGACION de un haz de electrones en la cámara de reacción llena de aire, de un acelerador de fusión; tal propagación se conseguirá proporcionando un canal de plasma magnético denso dentro del cual el haz de electrones focalizado puede conducirse desde el final de la línea de vacío aislada hasta el gránulo de combustible situado en el centro de la cámara. En los primeros experimentos con el nuevo aparato de 36 haces de los Sandia Laboratories (Albuquerque, Nuevo México), se utilizará un conjunto de finos alambres de tungsteno que irán desde los diodos hasta el blanco para guiar las descargas, en cuyo interior deben propagarse los haces. En futuros experimentos que tendrán que acometerse, los haces de láser pulsantes servirán para este propósito creando trayectorias estrechas, débilmente ionizadas, hasta el blanco. Este último diseño es el que se ilustra en esta figura, realizada, como la siguiente, por G. Kelvin.

causa de esta limitación, la densidad de potencia máxima que puede transmitirse por un pulso corto en el vacío sería de 100 millones de watt por centímetro cuadrado; por tanto, una línea coaxial de dimensiones útiles, 30 centímetros de diámetro, por ejemplo, transportaría poco más de cien mil millones de watt.

Sin embargo, se ha encontrado que, para niveles de muy alta potencia, el campo magnético transversal de la onda que se propaga desvía las órbitas electrónicas de manera que su radio de curvatura resulta menor que el espaciado entre los electrones. Bajo esta condición de elevada potencia, los electrones emitidos vuelven de hecho al electrodo de alto voltaje sin perder energía y pueden transmitirse potencias que excedan el billón de watt por la línea de 30 centímetros de diámetro. Este hecho, que se observa en parte en un tubo ordinario de tipo magnetrón, se observó por primera vez en el acelerador Hermes, en 1967. La viabilidad del método se demostró inicialmente en transmisión de potencia a una notable distancia en el acelerador Aurora, en 1972. Las cuatro líneas coaxiales del Aurora suministran, de un modo eficaz, 20 billones de watt a través de seis metros, con un campo de 500.000 volt por centímetro.

El análisis y la simulación por computador de este importante descubrimiento ha tardado varios años, pero hasta los dos últimos no se consiguió probar rigurosamente, y entenderse en toda su extensión, la idea subyacente. El principio se aplicó y generalizó en la Physics International, que demostró el transporte de energía a siete metros con un rendimiento del 77 por ciento. Una nueva simulación por computador en dos dimensiones, en Sandia, mostró cómo se logra el efecto. Los resultados del computador indican que, en la cabeza del pulso electromagnético, los electrones alcanzan el electrodo exterior o conectado a tierra, pero que, a una corta distancia hacia el interior del pulso, retroceden debido a que el campo magnético crece con rapidez y la energía se transporta, pues, de un modo eficiente por la línea.

Nuestro grupo de Sandia inició, hace poco, un ensayo general del concepto de línea de transmisión magnéticamente aislada, trabajando con una variante de la idea básica para ampliar aún más la concentración de potencia cerca del blanco. Estas pruebas se están realizando en un módulo prototipo de los 36 módulos que formarán el acelerador de fusión por haz de electrones de un millón de joule, que se halla en construcción y está programado para realizar experimentos con gránulos, a partir de 1980. La línea de prueba, alimentada por un pulso proveniente de dos líneas formadoras de pulsos compactas y aisladas por agua, mide siete metros de largo y consta de tres placas paralelas, cerradas en una cámara de vacío cilíndrica. La configuración en tres placas posibilita una concentración de potencia mayor que la que se consigue con un cable coaxial. En experimentos realizados por Pace J. Van Devender se ha alcanzado un rendimiento en el transporte de energía de casi 100 por ciento con valores de potencia de 800 mil millones de watt. Se ha obtenido ya una densidad de potencia de más de cien mil millones de watt por centímetro cuadrado en una pequeña sección de la línea de transmisión; un adelgazamiento progresivo de la línea debería aumentar aún más la densidad de potencia. Nuestra meta es producir un haz de electrones focalizado de 10 billones de watt por centímetro cuadrado al final de la línea de transmisión; el grado de concentración alcanzado nos permite ser optimistas con respecto a la consecución de esta meta.

El transporte del haz focalizado, desde el final de la línea de transmisión hasta una cámara del diodo que contenga el gránulo de combustible, constituye el próximo y último tramo de la cadena de transmisión de energía. Mientras no se desarrolló en toda su plenitud el concepto de línea de transmisión magnéticamente aislada, la mayor parte de nuestra investigación en Sandia tenía que ver con aceleradores en los que la onda electromagnética surgía del líquido dieléctrico, pasaba a través de la pared sólida aislante del diodo de vacío y se desdoblaba en dos haces que progresaban radialmente desde dos cátodos hasta un gránulo situado en el eje del diodo. Esta configuración obedecía no sólo a las fuerzas de focalización, que de forma natural hacen que el haz se comprima ("pince") hacia el eje, sino también a nuestro deseo de irradiar el gránulo uniformemente con dos haces y separar el diodo aislante de la onda explosiva del gránulo. Ante las limitaciones de la interrupción dieléctrica de la superficie del aislante sólido, este concepto dio paso al más nuevo de línea de transmisión magnéticamente aislada, pero permanece todavía el problema, nada secundario, de transportar el haz focalizado desde el extremo de la línea de vacío aislada hasta el centro de la cámara de reacción, donde debe incidir sobre el gránulo inyectado. Recientemente, se han registrado avances en lo que supone alcanzar una separación suficiente entre el gránulo que explota y el inyector del haz para que el haz focalizado se propague.

En la propagación de un haz intenso de electrones se ha encontrado que un plasma denso que contenga un campo magnético fuerte actúa como un conductor de haz, con escasa pérdida de energía de haz en distancias de pocos metros. Pero la posible inestabilidad del haz ha preocupado, toda vez que podía conducir, en una escala macroscópica, a la disipación de energía o, en una escala microscópica, al "serpenteo" del haz o a su ruptura en filamentos diminutos e inestables. Estos efectos han sido contemplados por muchos investigadores; y la conclusión a que se llega es que los haces de alta intensidad pueden propagarse si el plasma es suficientemente denso y tiene una conductividad eléctrica bastante alta.

El transporte del haz parece limitarse, por tanto, a descubrir un medio conveniente de crear un canal de plasma denso

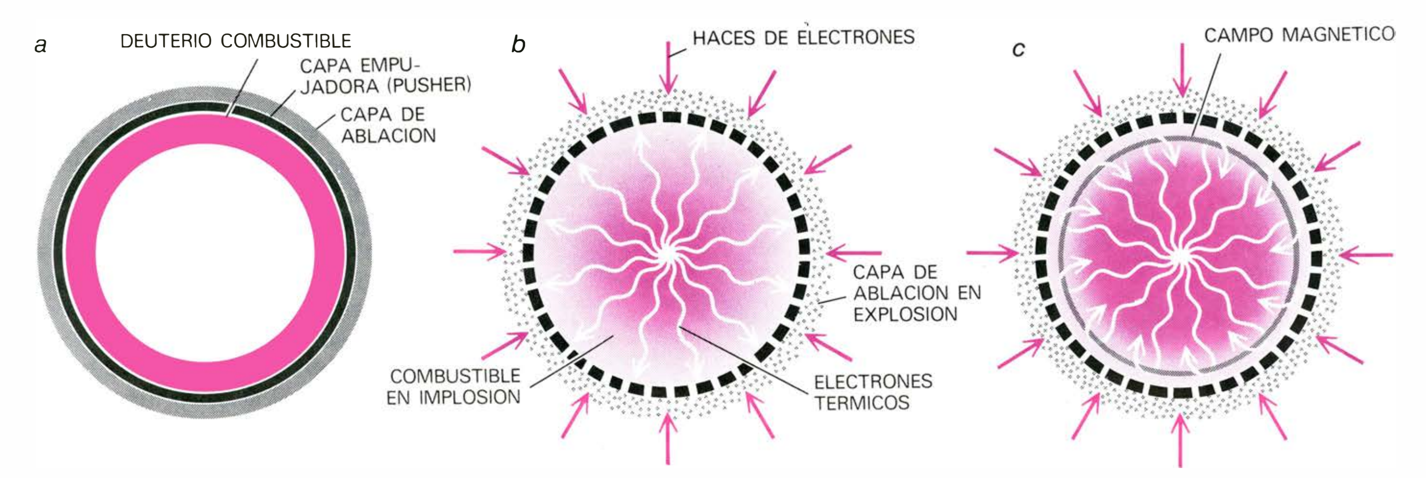
magnetizado sin usar bobinas de campo pesadas, que quedarían perjudicadas al conseguir una buena explosión del gránulo. Hace dos años, Paul A. Miller y yo mismo observamos que una descarga dirigida, en aire, satisfacía la mayor parte de las exigencias del canal de plasma. Tal descarga dirigida, que puede iniciarse por un conjunto relativamente pequeño de condensadores, no sólo sirve para calentar el aire hasta convertirlo en plasma a lo largo de una trayectoria estrecha sino que también genera el campo magnético que guía el haz de partículas hasta el blanco. Observando más de cerca este canal de plasma con la ayuda de una técnica holográfica, éste muestra una trayectoria de baja densidad uniforme y estable, envuelta por una capa cilíndrica de gas más densa y fría que ha sido empujada fuera del canal. En Sandia y en el Naval Research Laboratory se han propagado, de una manera eficaz y mediante esta técnica, haces de electrones de alta intensidad desde centenares a miles de ampère. Hasta ahora, para iniciar las descargas se ha usado un fino alambre de tungsteno que va desde el condensador al blanco; en el futuro se espera que una trayectoria débilmente preionizada, creada por un láser, cumplirá el mismo propósito para los pulsos repetitivos de un reactor de fusión. Aunque estas consideraciones sobre el reactor están empezando a recibir atención, nuestro problema inmediato sigue siendo demostrar la viabilidad de la ignición del gránulo blanco.

De todos los problemas que plantea el proceso de fusión por haz de electrones, uno de los más críticos lo constituye la deposición de la energía. La deposición eficaz de electrones de alto voltaje exige que las partículas se detengan en una delgada capa exterior del gránulo. A fin de reducir la cantidad de masa necesaria para detener las partículas, y reducir así la cantidad de energía necesaria para calentar la masa, conviene utilizar los efectos del campo autogenerado por el haz o utilizar campos externos para reducir el alcance de las partículas en el gránulo. Por ejemplo, un electrón de un millón de volt deposita normalmente sólo el 10 por ciento de su energía en una lámina de oro de 10 micrometros de espesor. Pero si el campo autogenerado por un haz fuertemente focalizado de un millón de ampère se introduce en el material, la penetración de los electrones se reduce de un modo eficaz y puede incrementarse el rendimiento en la absorción hasta el 50 por ciento.

En cierto sentido, este efecto debe atribuirse a la "estacionariedad" ("stagnation") del haz, que permite que cada electrón tenga más oportunidades de interaccionar con los átomos de la lámina por colisiones ordinarias. La demostración más palmaria de este efecto fue anunciada en 1977 por los miembros del grupo de Rudakov, quienes informaron haber calentado una lámina de oro de 10 micrometros hasta casi un millón de grados centígrados, con un haz de electrones de 10.000 joule focalizado hasta un diámetro de dos milímetros. Su proeza, que representa un incremento en la deposición en un factor diez aproximadamente, se ha reproducido de un modo parcial (a unas densidades de potencia algo menores) en nuestro laboratorio.

Suponiendo que pueda obtenerse una deposición eficaz de la energía, el siguiente problema será diseñar el blanco. Nuestras investigaciones sobre el diseño nos han enseñado que los blancos para fusión por haz de partículas tienen que ser necesariamente mayores (quizá de un diámetro de 12,7 milímetros) y más pesados que los blancos para el empleo de láser, debido a la mayor duración de nuestros pulsos y las limitaciones de focalización de las partículas cargadas energéticas. En razón de su masa mayor, los blancos de los haces de partículas requieren un aporte de energía mucho más elevado, lo cual no resulta inapropiado para la potencia pulsante, que tiende a ser rica en energía y relativamente pobre en potencia cedida. En otras palabras, podemos ceder energías bastante grandes en pulsos largos, y necesitamos tener blancos que alcancen las temperaturas del combustible requeridas con velocidades de implosión pequeñas.

Una noción de blanco que puede responder a estas exigencias se desarrolló primero en el programa láser ruso por N. G. Basov, en el Instituto de Física P. N. Lebedev. En 1975, Basov y su grupo propusieron el empleo de blancos agujereados bastante grandes; estos consistían en varias capas contiguas, y podían ser implosionados a lo largo de varias decenas de nanosegundos. La energía de alimentación se acumularía durante el tiempo de implosión, relativamente largo, y no se concentraría en el combustible hasta la última etapa del colapso del combustible. Los estratos más interiores de la capa agujereada consistirían en un material térmicamente aislante, por ejemplo el oro, que envolviera una delgada capa de combustible; ésta se implosionaría primero convirtién-

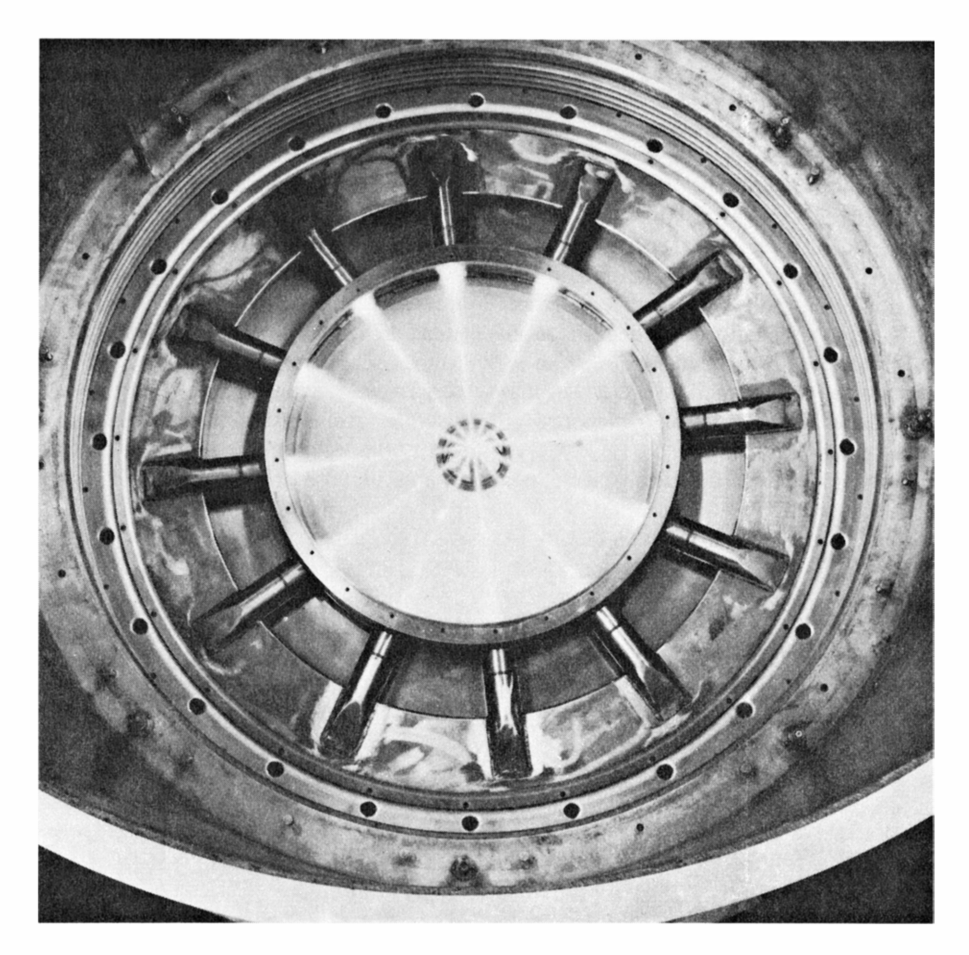


IMPLOSION de un gránulo de combustible de hidrógeno pesado; depende críticamente de las características del diseño del gránulo. El diseño de capas múltiples agujereadas (*a*) consta de una capa interior de deuterio combustible (*color*), una capa exterior de material explosivo por "ablación" (*gris*) y una capa intermedia "impulsora" (*negra*) para ayudar a comprimir y calentar el combustible simétricamente. Los haces de electrones incidentes explosionan la capa exterior (*b*), llevando a los estratos más internos hacia el centro e iniciando reacciones de fusión entre núcleos de deuterio del combustible. A fin de aislar mejor el combustible implosionado de la capa intermedia de alta densidad que la envuelve, los científicos de los Sandia Laboratories produjeron un campo magnético confinado dentro del gránulo mediante la descarga de un pulso eléctrico de alta intensidad a través de un filamento inmerso en el gránulo; la energía, que habría de perderse en la capa intermedia por la conducción de calor por electrones térmicos, o lentos (*flechas blancas onduladas*), queda confinada así a la región de implosión, aumentando la temperatura final del combustible (*c*). Mediante este método, James S. Chang y sus colegas han logrado obtener hasta un millón de neutrones de un gránulo de deuterio combustible con una velocidad de implosión, de unos cuatro centímetros por microsegundo.

dose en una zona supercalentada en el centro del blanco, con lo cual encendería, a partir del centro, el resto del combustible implosionado. En 1977, en el Lawrence Livermore Laboratory, de la Universidad de California, se propuso un método relacionado con éste, el cual se fundaba en capas múltiples no contiguas. Dicho diseño utiliza capas gruesas, evitando así "el gran formato" de las capas usadas en el enfoque ruso. Las capas más gruesas reducen la posibilidad de inestabilidades hidrodinámicas, que podrían destrozar la simetría de la implosión.

La estabilidad de la implosión ha sido objeto de considerables debates debido a que no han podido verificarse experimentos de implosión cuantitativos con las pequeñas energías de haz disponibles hasta el presente. Este problema tendrá que resolverse en un futuro próximo. Los blancos que se encienden en el centro, cuya importancia aumentará en las investigaciones venideras, contienen probablemente la clave para alcanzar las condiciones de ignición y de quemado eficaz con potencias bajas.

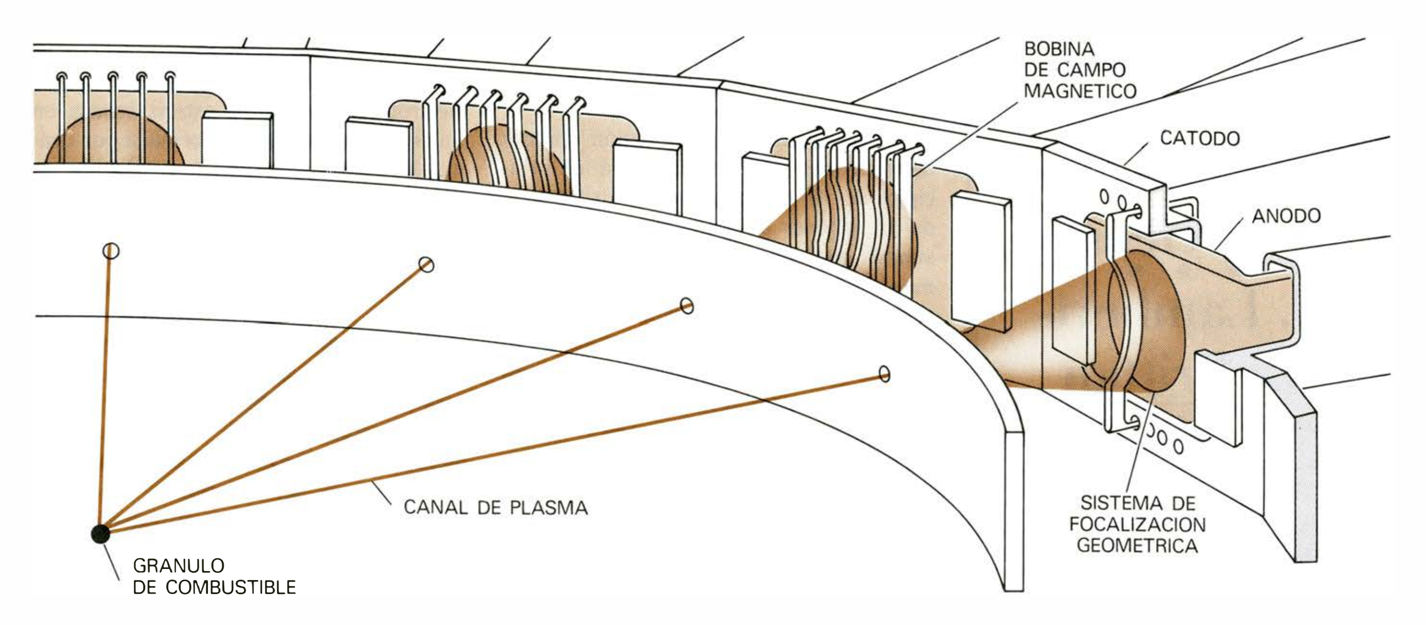
Trabajando con una deposición de electrones intensificada y un diseño de capas múltiples, los miembros del grupo de Rudakov pudieron obtener, en 1976, los primeros neutrones medibles generados por fusión a partir de un gránulo irradiado con haces de electrones. Trabajaron a un nivel de potencia modesto (menos de 100 mil millones de watt), pero emplearon una lámina de oro de cinco micrometros de espesor que envolvía una lámina de polietileno de 10 micrometros de espesor, para comprimir y calentar el combustible, contenido dentro de un bloque de plomo cónico. En Sandia obtuvimos un número similar de neutrones blanco (alrededor de un millón) en 1977 adoptando la noción de fusión por confinamiento magnético: la aplicación de un campo magnético para aislar térmicamente el combustible precalentado en el gránulo de una capa envolvente de alta densidad. Puede emplearse de este modo una velocidad de implosión menor, permitiendo pulsos más largos y exigencias de focalización del haz menos apremiantes. Se precalentó el combustible y se produjo el campo magnético localizado justo antes de la implosión de una descarga de alta intensidad a través de un filamento situado dentro del gránulo. Así fue como se obtuvo el millón de neutrones a partir de un combustible de deuterio con una velocidad de implosión relativamente baja, de cuatro centímetros por microsegundo (en relación con la primera implosión con éxito de gránulos por láser, que ocurrió a una velocidad de 20 centímetros por microsegundo).



CANALES DE PLASMA LUMINOSOS, utilizados para transportar 12 haces de electrones de alta energía. Pueden apreciarse alrededor de un blanco central (aquí un pilar de aluminio) en esta fotografía ilustrativa del interior del acelerador de haz de electrones de ocho billones de watt, Proto II, de Sandia. Los canales se creaban en el aire ambiental por la descarga de un conjunto de condensadores capaces de generar corrientes de unos 60.000 ampère por canal durante unos pocos microsegundos. (A fin de hacer la fotografía el sistema funcionó a un 12 por ciento aproximado de su potencia total.) Normalmente, esta visión de los canales de plasma está obscurecida por la parte de arriba de una cámara de vacío cilíndrica, de un metro de diámetro. Los 12 cátodos con el extremo de latón, fuera de la pared de la cámara de vacío, inyectan 12 haces de electrones acelerados independientemente en los canales de plasma que se han formado con anterioridad. Los haces avanzan luego hasta la zona central del blanco, donde se combinan. Este aparato experimental de 12 haces se destina al estudio de las propiedades de transporte de los haces de electrones y los haces de iones.

La complejidad encontrada en la física de la deposición de energía y en el diseño de blancos para haces de electrones ha aumentado recientemente el interés por el uso de haces de iones para fusión de confinamiento inercial. Con los aceleradores de haces de electrones existentes pueden obtenerse haces de iones ligeros, aunque con una energía un tanto reducida, al suprimir la corriente normal de electrones. La profundidad a la que se depositan los iones en el gránulo es menor que aquella a la que se depositan los electrones de la misma energía cinética; ello facilita las exigencias del diseño del gránulo y la obtención del haz. Por ejemplo, nuestros cálculos muestran que la irradiación de un blanco magnéticamente aislado con un haz de iones de 10 billones de watt daría una ganancia neta de energía; los cálculos que consideran un gránulo de ignición central magnéticamente asistido dan ganancias de energía superiores a 10 cuando se absorben potencias del haz de iones de menos de 50 billones de watt. Este requisito de ganancia elevada estará dentro del alcance de una versión mejorada del acelerador de fusión por haz de electrones de Sandia, cuya terminación se prevé para 1983. Pero es muy difícil focalizar iones de elevado voltaje, y apenas si estamos en los comienzos de los trabajos en distintos esquemas para concentrar haces de iones.

El enfoque inicial de producción de haces de iones, propuesto por Winterberg, consistía en suprimir el flujo de electrones en un diodo mediante el empleo de un campo magnético, el cual evitaba que los electrones llegasen al ánodo. Tal supresión es necesaria porque en un flujo paralelo de electrones e iones a través de un diodo la mayor parte de la energía la portan las partículas más ligeras, a saber: los electrones. Pero si los iones fueran protones, la corriente protónica sería aproximadamente el dos por ciento de la corriente del haz de electrones. Aplicando un campo magnético fuerte, paralelo a las superficies



POSIBLE ADAPTACION del nuevo acelerador de fusión por haz de electrones de los Sandia Laboratories (Albuquerque, estado de Nuevo México), que permitiría a los investigadores realizar experimentos con haces de iones, en vez de ensayar con haces de electrones. En este esquema se invertiría la polaridad del diodo: el elemento central de cada línea de transmisión serviría ahora como ánodo, y el elemento exterior sería el cátodo. Los iones ligeros (protones, por ejemplo) serían extraídos de un plasma formado en la cara cóncava de cada ánodo, que se diseña para que forme un dispositivo de focalización geométrica localizado entre cada par de líneas de transmisión. La estructura de rejilla, frente a cada dispositivo de focalización, establecería un campo magnético pulsante. Los iones pasarían a través de las bobinas del campo magnético y focalizarían para introducirse en una serie de canales de descarga de plasma.

del ánodo y del cátodo con bobinas pulsantes, se desvían los electrones y forman una nube giratoria, mientras que el campo sólo perturba ligeramente a los iones, de manera que pueden pasar a través de los agujeros o rendijas del cátodo. Si entonces se suministran electrones fuera del diodo, los iones serán neutralizados y se propagarán en trayectorias rectas. Si se da al diodo una forma conveniente para dirigir los iones hacia un punto común, se formará un intenso foco. Tal esquema teórico se sometió a prueba, primero, por el grupo de R. N. Sudan, de Cornell University. En Sandia, David J. Johnson y Glenn W. Kuswa han logrado recientemente un haz de iones y una potencia de 500 mil millones de watt. Esta potencia está próxima a las de los haces de electrones, pero queda por ver si puede lograrse una fuerza de neutralización fuerte y una divergencia de haz lo suficiente pequeña para focalizar el haz de iones de un modo geométrico.

Otro método para la generación de haces de iones y la supresión de electrones está siendo analizado por Goldstein y Gerald Cooperstein, del Naval Research Laboratory. Se apoyan en los campos magnéticos, autogenerados por la elevada corriente de un diodo, para limitar el flujo de la corriente de electrones hacia el ánodo. Al no aplicar ningún campo magnético adicional fuera del diodo, la neutralización de la fuerza puede lograrse con más facilidad. De esta manera, han producido un haz de iones de una potencia de trescientos mil millones de watt y un rendimiento del 50 por ciento; además han usado un esquema de focalización geométrica sencillo para obtener una densidad de corriente de 70.000 ampère por centímetro cuadrado.

Estamos preparando el funcionamiento del acelerador de fusión por haz de electrones de Sandia, tanto en el modo de electrones como de iones, al objeto de que puedan evaluarse con exactitud ambas opciones. En uno de los diseños del diodo se generarían múltiples haces de iones al final de las líneas de transmisión aisladas desde el punto de vista magnético, que serían focalizados geométricamente a lo largo de una distancia de casi un metro. Estos haces focalizados se transportarían luego al blanco por canales de descarga de plasma. El acelerador se usará también para evaluar un concepto de "empaquetamiento del haz" que se aplica rutinariamente en aceleradores de partículas convencionales: aumentar la potencia del haz de iones mediante compresión de los pulsos de iones en el espacio y el tiempo. Tal compresión espacio-temporal puede darse debido a que los iones en el intervalo de energías de unos pocos megavolt tienen un movimiento relativamente lento; si se aumenta el voltaje de aceleración durante el período de un pulso, los iones más rápidos del final del pulso pueden alcanzar a los iones más lentos inyectados antes, proporcionando un pulso más corto y una potencia mayor en el blanco. De esta manera, puede alcanzarse una ganancia de potencia de, al menos, un factor 5.

Otro enfoque más reciente de la fusión por haces de partículas es el de la aceleración de iones pesados. Algunos físicos que han participado en la construcción de aceleradores de alta energía para la investigación en el campo de las partículas elementales han propuesto que la tecnología de los aceleradores clásicos puede adaptarse a los reactores de fusión. Han observado que, empleando iones pesados, puede lograrse la potencia necesaria a potenciales mucho más altos y, por tanto, a corrientes más bajas. Una de las ventajas sobresalientes de trabajar a un potencial alto sería que la potencia se suministraría al haz en etapas sucesivas, separadas físicamente, con lo cual se facilitaría mucho la labor de concentración de potencia. La tecnología y la economía de este método están ahora en estudio.

El programa estadounidense sobre el desarrollo de un acelerador de electrones de 100 billones de watt, necesario para experimentos de fusión por confinamiento inercial, empezó en 1974 con el diseño de Prestwich, en Sandia, de un acelerador de un billón de watt llamado Proto I; éste se puso en funcionamiento en 1975 y opera principalmente empleando el sistema de los haces de iones. El siguiente paso consistió en las investigaciones de Thomas Martin y su grupo, que culminaron en 1977 con el funcionamiento eficaz de un acelerador de ocho billones de watt: el Proto II. Muchos de los elementos de almacenamiento de energía, conmutación y formación de pulsos para los aceleradores de la nueva generación han sido probados con éxito en el Proto II. Y en él se experimentan hoy con haces múltiples de iones y haces de elec-

trones a fin de proporcionar los datos necesarios de propagación del haz para diseñar la nueva máquina.

El nuevo acelerador de fusión por haz de electrones de Sandia constará, en principio, de 36 módulos que darán un total de 30 billones de watt; se construirá de suerte que pueda ampliarse hasta al menos 60 billones de watt. El montaje del acelerador empezó el verano pasado, y la prueba de la potencia pulsante dará comienzo a finales de este año. Si el éxito acompaña a estas primeras fases, la ampliación puede acabarse en 1983, lo que permitiría la experimentación de ignición de gránulos en 1985. Y si estos últimos pasos tienen éxito también, entonces la sencillez que les es propia y la eficiencia de la técnica de haz de partículas habrán sentado las condiciones para futuras aplicaciones de los reactores.

Si se quiere que esta tecnología vaya más allá de la demostración de la viabilidad científica de la fase de reactor de potencia, habrá que demostrar la capacidad de los mecanismos de aceleración pulsante repetitivos para operar durante un año (casi mil millones de pulsos), por lo menos, con un mantenimiento nulo, o casi nulo. Ello exigirá componentes tales como conmutadores de chispa refrigerados por gas y transformadores de alto voltaje, en sustitución de los componentes desarrollados para las aplicaciones anteriores de un pulso. En Sandia se sigue un proyecto de investigación encaminado a la solución de estos problemas; recientemente ha logrado hacer funcionar un generador que trabaja a 100 pulsos por segundo con una potencia media de 30.000 watt y una potencia máxima de diez mil millones de watt. Este sector de la técnica es uno de los aspectos menos desarrollados de la potencia pulsante, y en probar su viabilidad se habrán de gastar cantidades respetables de tiempo y dinero. Creemos que un acelerador con una potencia media de un millón de watt podrá ensayarse ya en 1985. Si para entonces se ha demostrado la viabilidad científica, podremos proponer el paso siguiente: un pequeño reactor de potencia experimental con una potencia media de diez millones de watt.

En nuestros estudios a largo plazo hemos estado considerando un pequeño reactor de potencia que tendría una cámara de reactor de menos de tres metros de radio. El reactor funcionaría a 100 millones de watt de potencia eléctrica y exigiría una ganancia de energía de gránulo de sólo 30. Cantidades tan bajas permitirían un alto grado de flexibilidad en el tamaño, localización e instalación de los futuros reactores de energía. En los estudios realizados en la Bechtel Power Corporation se ha considerado un reactor de mil millones de watt dirigido por haz de electrones; la máquina estaría basada en una envoltura de fisión (formada por uranio 238 o torio 232), que produciría no sólo potencia eléctrica sino también material fisionable para los reactores de fisión clásicos de agua ligera. De las primeras estimaciones de Bechtel se concluye que un coste de potencia económicamente aceptable podría lograrse con ganancias de gránulo de 18 y una ganancia de la cobertura de 5. Se discute si un tal híbrido resulta o no deseable. En cualquier caso, el elevado rendimiento de los aceleradores de partículas nos permite pensar en el método de la fusión pura con pequeñas ganancias de gránulo, idea que ejerce poderosa atracción desde una perspectiva ambientalista.

El programa estadounidense de fusión por haz de partículas va avanzando a un paso comparable al programa ruso del Instituto Kurchatov, aunque (según Rudakov) el Comité de Estado para Energía Atómica de la Unión Soviética parece que ha hecho unas consignaciones más fuertes a la fusión por haz de electrones que a la fusión por láser, lo opuesto a las prioridades establecidas por el Departamento de Energía de los Estados Unidos. Las razones de la posición rusa parecen ser de orden pragmático, basadas más en la sencillez, posibilidad de modificar la escala y más bajo costo de la tecnología que en factores de carácter científico. El esfuerzo del Instituto Kurchatov se centra en el desarrollo de un acelerador de 50 millones de dólares, llamado Angara V, que tendrá una salida de energía de 100 billones de watt cuando empiecen los experimentos con gránulos, programados para 1984. Los rusos están ensayando con gránulos con ganancias de energía muy altas (superiores a 1000), junto con una cobertura de fisión encaminada a producir la potencia suficiente para pagar la complejidad de los gránulos y el costo de sustituir las líneas de transmisión magnéticamente aisladas. Los investigadores soviéticos no planean, por ahora, propagar sus haces de partículas; por el contrario colocarán las líneas de transmisión en contacto con el gránulo, permitiendo que la elevada ganancia de energía y la producción de combustible fisionable compense la frecuente sustitución de las líneas de transmisión estropeadas. Tanto si prevalece finalmente este método como si lo hace la técnica de propagación que nosotros intentamos, es evidente que la tecnología está evolucionando rápidamente hacia la irradiación de gránulos de combustible con haces de partículas de alta intensidad lo bastante potentes como para producir una importante cantidad de energía de fusión.

El ensamblaje de un virus

El virus del mosaico del tabaco está constituido por una cadena de ácido nucleico, contenido en una formación tubular proteica. Ambos componentes se unen de forma espontánea, de acuerdo a un mecanismo complejo

P. Jonathan G. Butler y Aaron Klug

Los virus son partículas complejas formadas por moléculas gigantes inertes: proteínas y ácidos nucleicos (ADN o ARN). Carecen de actividad metabólica propia y sólo se manifiestan como entidades vivientes al penetrar en la célula huésped. Por esta razón son parásitos obligados, capaces de reproducirse sólo si pueden aprovecharse de la maquinaria enzimática de la célula huésped.

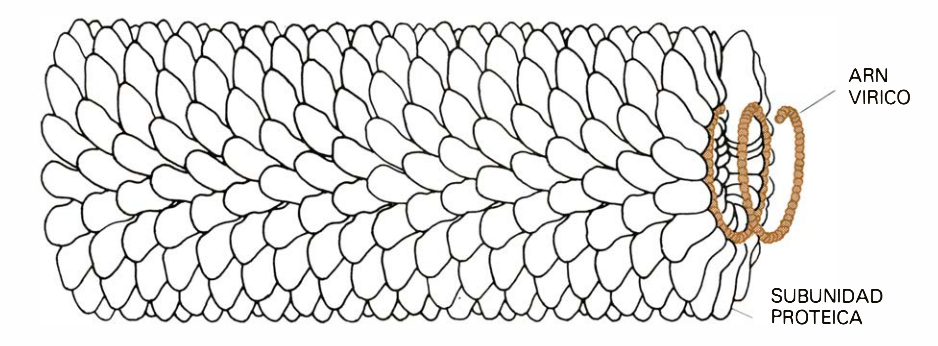
A causa de su extrema simplicidad, los virus son unas herramientas inestimables para los biólogos moleculares interesados en la estructura y función de los genes. Los virus proporcionan también un modelo sencillo de desarrollo celular, porque su multiplicación en la célula huésped implica la expresión controlada de un pequeño número de genes, y el correspondiente ensamblaje de una cantidad reducida de proteínas en una estructura altamente ordenada. El ensamblaje de los virus ha constituido un modelo para la construcción de estructuras de gran tamaño en las células vivas.

El trabajo de nuestro grupo en el Medical Research Council Laboratory of Molecular Biology en Cambridge –Inglaterra– se ha dedicado al virus del mosaico del tabaco, uno de los más simples y manejables; activo sobre las células de esta planta. Este virus está constituido por una cadena sencilla de ARN envuelta en una proteína tubular con una parte central hueca. El ARN vírico tiene 6400 nucleótidos y está intercalado dentro de las espiras de una hélice plegada y apretada de 2130 subunidades proteicas idénticas, de tal modo que cada subunidad proteica encierra tres nucleótidos de ARN. La proteína rodea y aísla al ARN protegiéndolo hasta que el virus ha infectado eficazmente a la célula huésped. Cuando el ARN ha penetrado en la célula, se libera de la proteína y este genoma produce gran cantidad de partículas víricas.

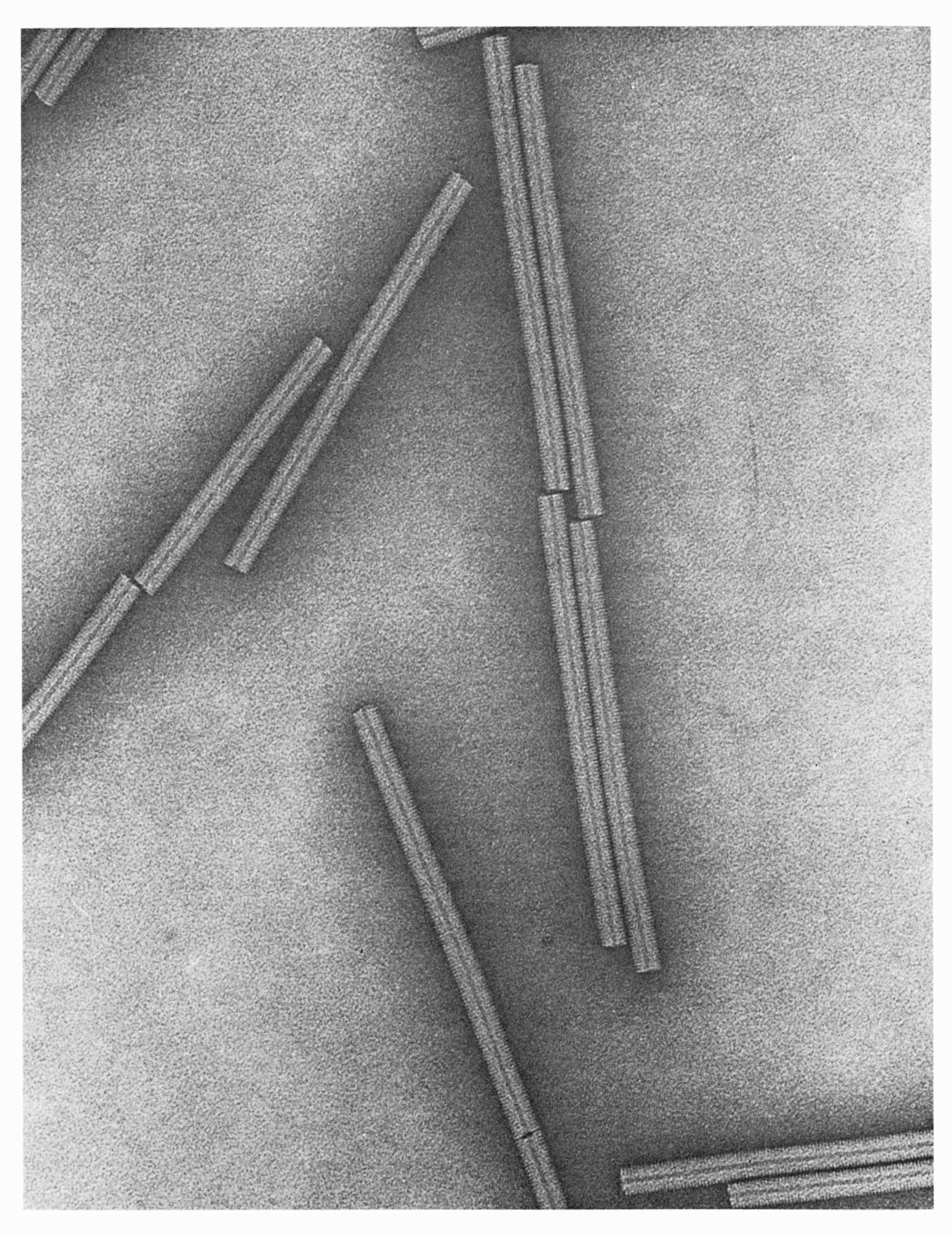
En una serie clásica de experimentos realizada en 1955 por Heinz Fraenkel-Conrat y Robley C. Williams, de la Universidad de California en Berkeley, se demostró que el virus del mosaico del tabaco podía ser reconstruido en el tubo de ensayo a partir de sus componentes aislados: ARN y proteína. La mezcla de ambos componentes proporciona partículas víricas infecciosas que bajo el punto de vista estructural no difieren del virus original. Por consiguiente, toda la información necesaria para la construcción del virus está implícita en sus partes, que se "autoensamblan" de una manera espontánea cuando están en solución.

El autoensamblaje de una estructura helicoidal como la del virus del mosaico del tabaco no parece particularmente singular. Podría postularse que las subunidades proteicas tienen una superficie geométrica precisa, de suerte que pueden ensamblarse entre sí de acuerdo a un modelo único: las subunidades contactan entre sí de manera idéntica y repetida hasta constituir una estructura regular. Siguiendo el esquema de ensamblaje más lógico, el ARN libre reacciona con las subunidades proteicas individuales iniciando la formación de la hélice. De esta manera, las subunidades proteicas individuales se unen entre sí de un modo sencillo, una o pocas cada vez, hasta la finalización del crecimiento de la hélice, recordando el crecimiento cristalino, pero en este caso fijándose al ARN a medida que va creciendo. Ya que ambos, la partícula vírica y el ARN, tienen distintas terminaciones, se puede intuir que el crecimiento comience en un extremo del ARN y continúe hacia el otro. De cualquier modo, estas sencillas ideas se consideran ya erróneas. Con visión retrospectiva se puede comprender por qué el virus ha adoptado lo que en principio parecía ser una estrategia mucho más compleja.

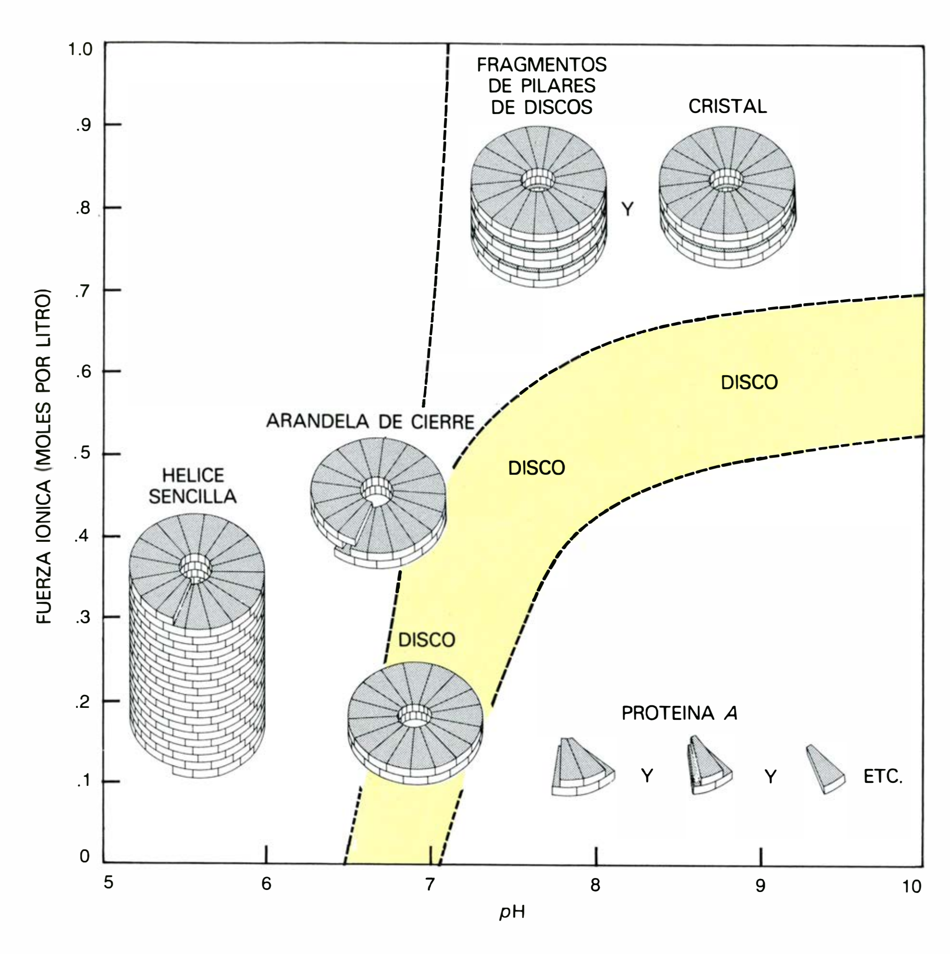
Los primeros experimentos de reconstrucción parecían tener muchos aspectos en común con el proceso de ensamblaje natural. El reensamblaje artificial del virus del mosaico del tabaco, a partir de sus componentes proteicos y ARN, cursaba solamente a *p*H neutro y a temperatura ambiente, condiciones similares a las que se dan en las células del huésped vegetal. Además el reensamblaje era bastante específico; funcionaba mejor con ARN de la misma cepa del virus o de cepas muy relacionadas, y en cambio no cursaba o lo hacía difícilmente con otros ARN naturales o sintéticos. El único aspecto confuso del problema del reensamblaje era su baja velocidad: se requerían seis horas o más para obtener una producción máxima de partículas víricas



ESTRUCTURA HELICOIDAL del virus del mosaico del tabaco, puesta de manifiesto en este esquema que representa aproximadamente la sexta parte de la longitud de la partícula vírica cilíndrica. El virus está constituido por una cadena sencilla del ARN *(color)* formada por unos cuatro genes, empaquetados entre las espiras de una cubierta proteica helicoidal, que consta de 2130 subunidades idénticas. La longitud final del cilindro viene determinada por la longitud del ARN. La proteína protege al ARN hasta que el virus infecta su célula huésped; después de la infección, el ARN se desprende de la proteína, y los genes víricos se expresan a través de los enzimas del huésped. El hueco central del cilindro de la partícula vírica, aparte de ser una consecuencia trivial de la forma de empaquetamiento proteico, condiciona el ensamblaje del virus.



MICROGRAFIA ELECTRONICA del virus del mosaico del tabaco (aumento del orden de 300.000 diámetros), realizada por John T. Finch, del Medical Research Council Laboratory of Molecular Biology en Cambridge, Inglaterra. Los virus "autoensamblados" espontáneamente en el tubo de ensayo, a partir de su ARN y las subunidades proteicas, da lugar a partículas víricas infecciosas idénticas a las que se encuentran en la naturaleza. El ensamblaje del virus proporciona un modelo de cómo se construyen las grandes estructuras dentro de las células vivas. Este virus es activo sobre las células de la planta del tabaco.



LAS SUBUNIDADES PROTEICAS se agrupan de forma distinta, dependiendo del *p*H del medio en que se encuentre y la fuerza iónica (concentración de sales) del medio circundante. Sólo se encuentran subunidades proteicas individuales bajo condiciones de fuerza iónica muy baja y alta alcalinidad (*p*H 10). Bajo condiciones alcalinas suaves (*p*H 8) aparecen agrupaciones de tres o más subunidades. En una solución neutra (*p*H 7), similar a las condiciones que se dan en la célula huésped, las subunidades se disponen en discos planos constituidos por 34 subunidades que forman dos anillos. Si la solución es ácida (*p*H alrededor de 6,5) la proteína forma largas hélices carentes de ARN. A *p*H neutro las hélices sólo se ensamblan en presencia de ARN vírico. La "arandela de cierre", que consta de un único disco, es una forma intermedia procedente de discos convertidos en hélices. El *p*H es el logaritmo negativo de la concentración de protones o hidrogeniones.

ensambladas. Este período de tiempo resultaba demasiado prolongado para el ensamblaje natural del virus porque el ARN vírico queda protegido de cualquier lesión sólo cuando está completamente rodeado de proteína.

El ensamblaje de cualquier agregado grande de subunidades idénticas, como un cristal, puede considerarse en dos etapas: formación del núcleo y crecimiento, o en el caso del virus del mosaico del tabaco, inicio y elongación. La fase limitante del ensamblaje del virus, como ocurre en la mayoría de los otros casos, es el inicio. A causa del gran número de subunidades proteicas por espira de la hélice ($16\,{}^{1}/_{3}$) podrían ligarse alrededor de 18 subunidades separadas a la molécula flexible de ARN antes de que la estructura en formación se cerrara sobre sí misma, convirtiéndose en algo más que un agregado lineal proteico a lo largo del ARN. Esta dificultad se evitaría si existiera algún fragmento disponible sobre el que pudieran ensamblarse las primeras vueltas de la hélice hasta que el tamaño fuera suficientemente grande para conferirle la estabilidad necesaria.

La solución de este problema se halló apoyándose en una observación curiosa. El propio revestimiento proteico, libre del ARN vírico, puede agregarse además de en la forma de hélice, en otras formas distintas aunque relacionadas. Donald L. D. Caspar, de la Universidad de Brandeis, intuyó que algunas formas podían suministrar datos sobre el modo de ensamblaje del virus. Los distintos estados de agregación fueron examinados en detalle, en primer lugar, por nuestro grupo (incluyendo a Anthony C. H. Durham y John T. Finch); otros investigadores, a partir de entonces, han contribuido a la construcción del modelo. Aunque persisten discrepancias en los detalles, la línea general está ahora clara: la envoltura proteica está diseñada de forma tal que sabe no sólo a dónde se dirige (el recubrimiento de la hélice vírica) sino también cómo llegar allí.

El factor dominante que controla el estado de agregación de la envoltura proteica es el *p*H del medio (logaritmo negativo de la concentración de protones o hidrogeniones en el medio). En una solución ligeramente alcalina (*p*H superior a 7), la cubierta proteica tiende a ser una mezcla de pequeños agregados de varias subunidades; a esta mezcla se la denomina proteína *A*. Cerca de la neutralidad (*p*H 7) aparece una estructura diferente y específica, consistente en unos discos constituidos por dos capas de subunidades. Cada capa está formada por un anillo de 17 subunidades que coinciden aproximadamente en número con las de una espira de la hélice vírica. En condiciones intracelulares semejantes, hasta el 80 por ciento de la cubierta proteica llegaba a incorporarse a los discos; el resto era proteína *A*. Al acidificar de un modo brusco la solución (*p*H 5), los discos se convierten directamente en cortas "arandelas de cierre" helicoidales de dos espiras de longitud: las "arandelas de cierre" se mantienen entonces en un cierto desorden y eventualmente intervienen en la producción de hélices de longitud indefinida, de estructura muy similar a las partículas víricas, excepto en que carecen de ácido ribonucleico vírico.

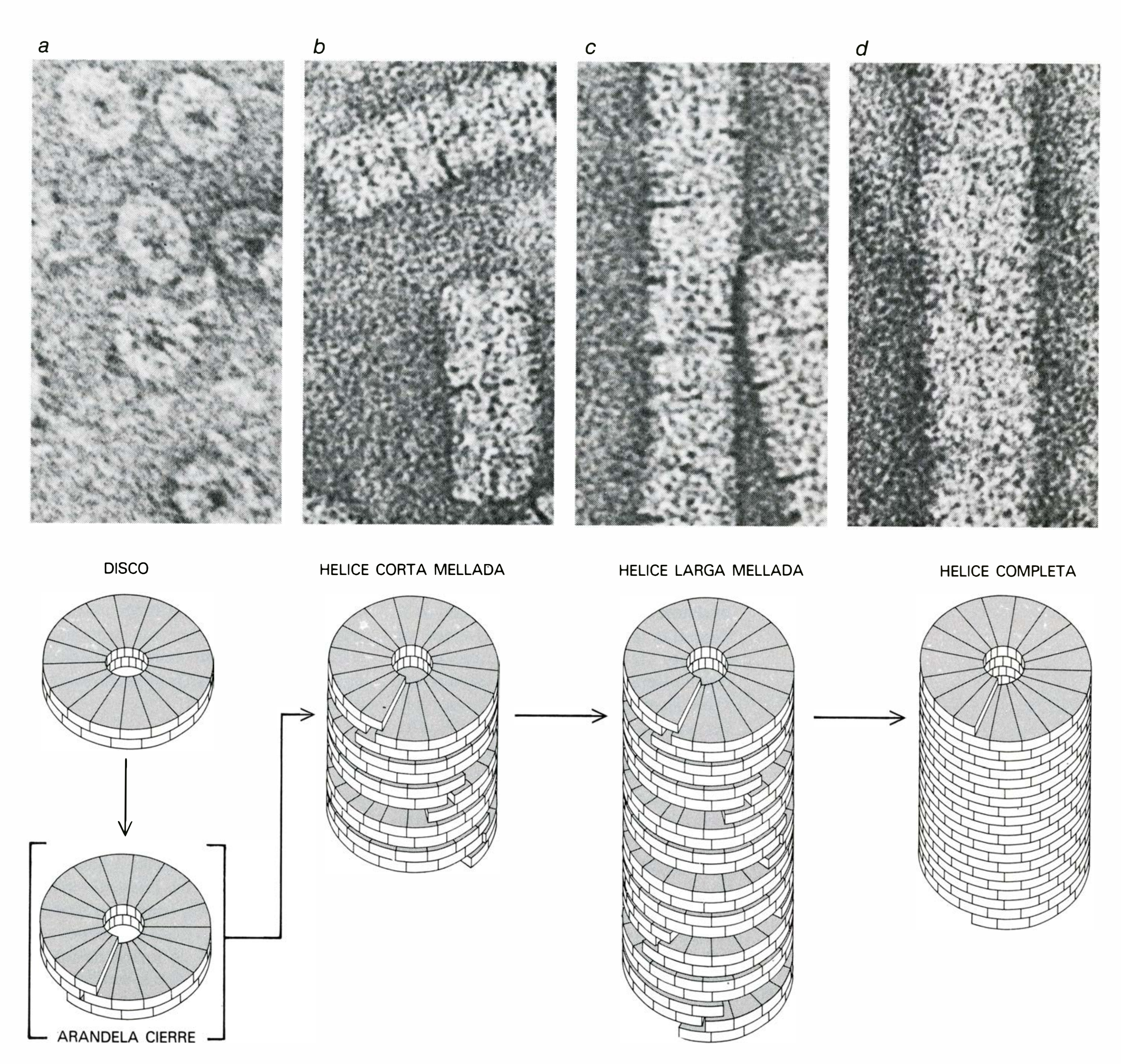
El agregado discoidal de la cubierta proteica presenta propiedades significativas. Es la forma dominante de las proteínas bajo condiciones que se conocen como óptimas para el reensamblaje del virus en el tubo de ensayo, y esto es aplicable al reensamblaje normal en la célula huésped. Además, el tamaño y estructura de los discos sugieren que éste puede ser idóneo para que se dispare la iniciación del ensamblaje del virus. Teniendo en cuenta la hipótesis según la cual el disco actuaría como centro de nucleación, nosotros observamos su efecto sobre la reacción del ensamblaje. Obtuvimos unos resultados espectaculares. Se formaban partículas víricas completas en 10 minutos, en lugar de las seis horas que se habían precisado en los experimentos de reconstrucción en los que la proteína estaba en forma disgregada. Llegamos a la conclusión de que si los discos eran necesarios para la iniciación, gran parte de este tiempo transcurriría esperando que las subunidades disgregadas se ensamblaran espontáneamente en discos, antes de que pudiera comenzar el crecimiento de las partículas víricas.

La idea de que los discos están implicados en el proceso natural de la iniciación, se reforzó mediante experimentos en los cuales el reensamblaje se hizo a partir de ARN obtenidos de distintas fuentes. Encontramos que los discos interaccionaban mucho más fácilmente con el ARN del virus del mosaico del tabaco que con otros ARN sintéticos o extraños, asegurando que sólo se

seleccionara el ARN vírico para su revestimiento con la proteína. La estructura del disco permite que se enlace una espira completa durante la primera etapa, de modo que proporciona una mayor selectividad que la que se daría si tres nucleótidos se unieran a una simple subunidad proteica.

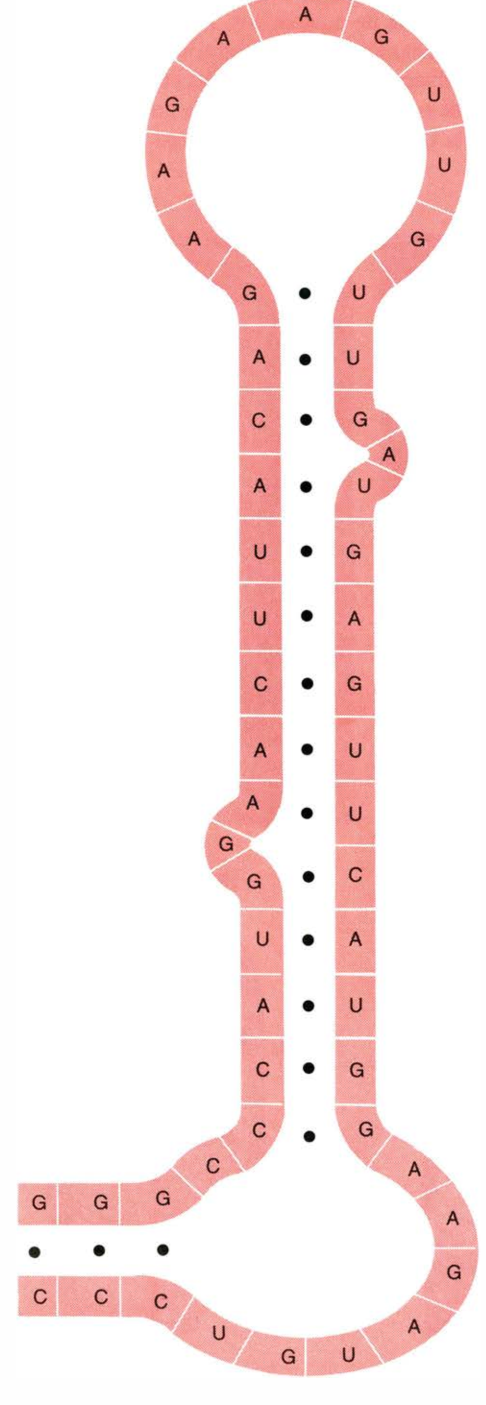
Esta especificidad implica asimismo la existencia de una secuencia única de nucleótidos en el ARN vírico que interacciona estrechamente con el disco de proteína. Esta secuencia debe abarcar una extensión importante de ARN para que determine la elevada selectividad observada: en una espira del primer disco, pueden interaccionar alrededor de 50 nucleótidos con las 17 subunidades proteicas. Por consiguiente, nosotros empezamos aislando regiones próximas a la de iniciación del ARN suministrando justo la proteína necesaria para permitir la iniciación pero no el crecimiento, digiriendo entonces los finales no protegidos del ARN con un enzima. Con nuestro colega David Zimmern, establecimos que se podían aislar una serie de fragmentos de ARN que contenían una secuencia central común, si bien las longitudes variasen para cada terminación. Los fragmentos más cortos tenían alrededor de 65 nucleótidos, un poco más de la longitud necesaria para formar una espira completa del disco, y encontramos que se ligaban a los discos de forma débil y específica. La conclusión a que llegamos fue que los fragmentos cortos contenían toda la información necesaria para especificar la reacción normal de iniciación.

El gran tamaño y la productividad relativamente baja de la región de iniciación del ARN del mosaico del tabaco dificultaron técnicamente la determinación de esta secuencia de nucleótidos. Mientras nosotros estábamos trabajando en el aislamiento y establecimiento de la secuencia de nucleótidos de esta región, Léon Hirth y sus colegas, de la Universidad de Estrasburgo, habían em-



TRANSFORMACION DE LOS DISCOS EN HELICE, en ausencia del ARN vírico. Puede realizarse por descenso del *p*H de la solución para estabilizar el agregado helicoidal. (En la parte inferior se muestran los esquemas de las distintas estructuras.) Si el *p*H desciende rápidamente, los discos proteicos se convierten en hélices cortas de dos espiras ("arandelas de cierre") sin disociarse en subunidades *(a)*. A los pocos minutos, las "arandelas de cierre" se acumulan en vertical, al azar, para dar lugar a hélices melladas *(b)*. Estos cortos pilares se agregan lentamente en un tiempo aproximado de 15 minutos, y forman una larga hélice *(c)*. Por último, las imperfecciones de los pilares desaparecen en pocas horas dando lugar a la hélice proteica completa *(d)*.

pezado a determinar la secuencia de nucleótidos en varios fragmentos del ARN en el virus del mosaico del tabaco, que habían aislado a partir del ARN vírico sin cubierta proteica, parcialmente digerido por un enzima. De este modo lograron resultados aceptables con estos fragmentos cortos, y la



ESTRUCTURA EN HORQUILLA de la región de iniciación del ARN vírico, deducida por David Zimmern a partir del apareamiento más probable de las bases de nucleótidos en la cadena del ARN. Esta ordenación se alcanza a partir de un fragmento de la doble hélice débilmente unido, cuyo extremo superior contiene una secuencia de bases especial. El lazo, que presenta un triplete especial con guanina *(G)* en posición central y uracilo *(U)* o adenina *(A)* en las demás posiciones, se une al primer disco proteico para dar comienzo al ensamblaje del virus.

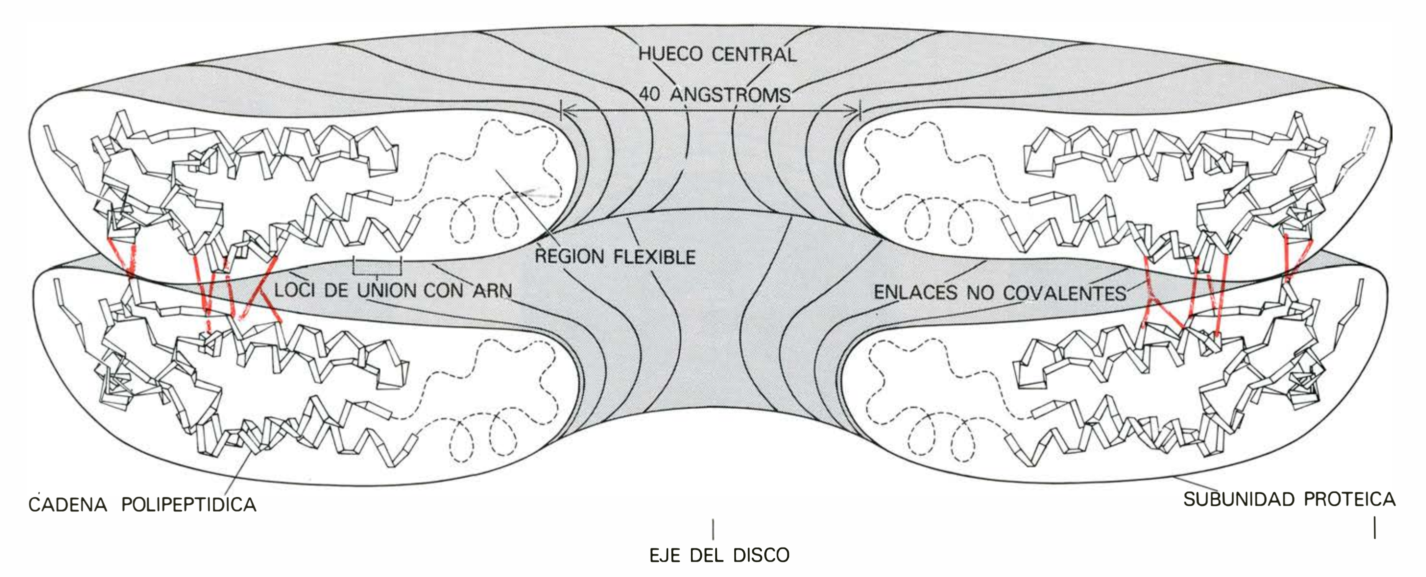
determinación de sus secuencias de nucleótidos no fue demasiado difícil. Por suerte uno de sus fragmentos incluía la región de iniciación, y a partir de nuestros resultados conjuntos se pudo identificar y completar la secuencia. La secuencia de la región de iniciación sugiere una estructura en horquilla: una rama que consiste en una doble hélice de nucleótidos muy débilmente apareados y, en la parte de la bifurcación, un anillo con nucleótidos no apareados. El anillo y la parte adyacente de la horquilla están constituidos por una serie poco usual de nucleótidos con un triplete repetido de guanina (*G*), adenina (*A*) y uracilo (*U*) y con una guanina cada tres posiciones *AGAAGAAGUUGUUGAUGA*. Puesto que hay tres loci de unión del nucleótido por subunidad proteica, se podía especular que una forma de triplete como ésta condujera al reconocimiento de la horquilla del ARN por el disco proteico durante el proceso de la iniciación.

Con la región de iniciación identificada y conocida la secuencia de sus nucleótidos, era posible localizar la región a lo largo de la molécula del ARN. De nuevo, con obvia expectación, se planteaba que la secuencia de iniciación estuviera cerca de un extremo del ARN, resultando falso este supuesto. Zimmern y T. Michael A. Wilson mostraron que la región de iniciación estaba situada a nivel de la sexta parte de la longitud del ARN. Así, unos 5000 nucleótidos se cubrirán de proteína en una dirección a lo largo del ARN de doble hélice, mientras que el resto, del orden de 1000 nucleótidos, lo harán en dirección opuesta. Paralelamente a los estudios con la secuencia del ARN, nosotros y nuestros colegas investigamos la estructura detallada de los discos proteicos mediante técnicas de difracción de rayos X. (Mientras tanto, Kenneth C. Holmes, del Instituto Max Planck de Investigación Médica en Heidelberg, siguió los estudios con rayos X sobre el virus, ya iniciados por J. D. Bernal en la Universidad de Cambridge hacia 1936.) Los discos formarían cristales tridimensionales, de modo que el análisis por rayos X es semejante a la cristalografía proteínica convencional, excepto en el gran tamaño de la unidad repetitiva. El disco, que contiene 34 subunidades proteicas y alrededor de 50 nucleótidos con un peso molecular aproximado de 600.000 daltons, fue la primera estructura de gran tamaño examinada en detalle por análisis con rayos X. Nuestro grupo en Cambridge (incluyendo más recientemente a Ann C. Bloomer, Gerard Bricogne y John N. Champness) ha tardado doce años en poder llevar a cabo un análisis crítico. Los formidables problemas técnicos se salvaron sólo después de que otros investigadores desarrollaran, en nuestro laboratorio, un aparato especial para manipular estructuras de ese tamaño.

El disco tiene una simetría de orden 17 que da origen a una información redundante en los datos de rayos X, los cuales podían utilizarse en la metodología analítica. La estructura se conoce ahora a una resolución óptima de tres angstroms (un angstrom es 10^{-7} milímetros, aproximidamente el diámetro de un átomo de hidrógeno). Los análisis con rayos X proporcionaron un mapa de densidad electrónica del disco proteico, e interpretamos el mapa obteniendo un modelo atómico detallado de la cubierta proteica. No se ha conseguido establecer todavía las interacciones individuales entre los aminoácidos en la proteína y los nucleótidos en el ARN vírico. Incluso la estructura derivada de un análisis a niveles de resolución de 5 angstroms –que nosotros habíamos alcanzado hace ya algunos años– tenía importantes consecuencias para la comprensión del proceso de ensamblaje vírico.

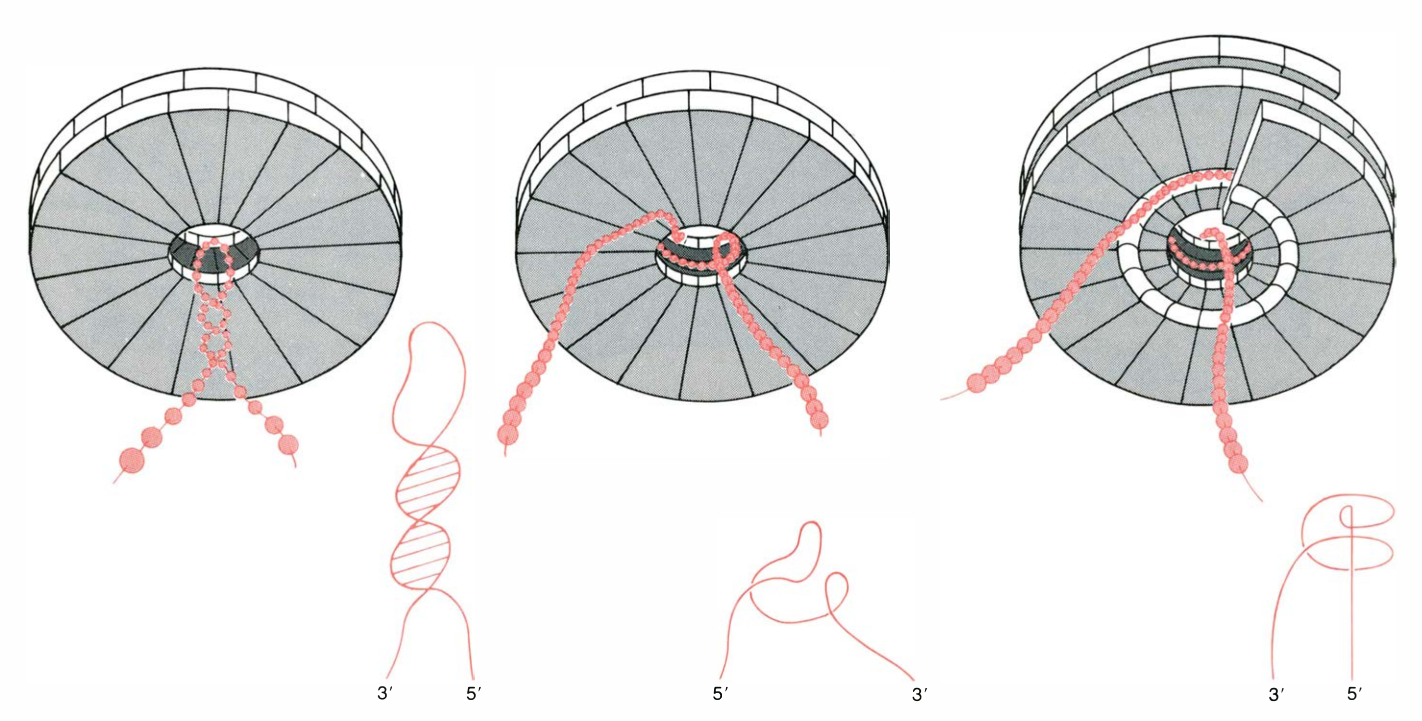
En el disco proteico las subunidades del anillo superior son casi planas, mientras que las del anillo menor están inclinadas dirigiéndose hacia el centro, de modo que los dos anillos se tocan sólo por la parte exterior del disco y se abren hacia el centro como un par de mandíbulas. Esta geometría viene destacada además por la flexibilidad de la cadena de aminoácidos en la región de la proteína dirigida hacia el punto de unión del ARN: en esta región, la cadena está desordenada, y no estructurada regularmente. De todas formas, cuando el disco se convierte en hélice vírica, las subunidades de ambos anillos se inclinan hacia arriba y hacia el centro, hasta que todas forman un ángulo semejante con las espiras adyacentes paralelas y en íntimo contacto. Las regiones internas de las subunidades, agrupadas de esta forma ajustada, adquieren una estructura definitiva que engloba al ARN vírico, protegiéndolo. Por consiguiente, la transición estructural se hace cerrando las mandíbulas de los discos con el ARN atrapado en su interior.

En este período de trabajo se simultanearon los esfuerzos para determinar la secuencia de nucleótidos en el ARN y dilucidar la estructura de los discos proteicos con análisis de difracción de rayos X. Nosotros considerábamos la estructura del disco y la forma en que la región de iniciación en horquilla, del ARN vírico, podía interaccionar con éste, para disparar esta conversión a la "arandela de cierre" de forma helicoidal. Con Zimmern propusimos una hipótesis para la iniciación según la cual la horquilla del ARN se autoinsertaría a lo largo del hueco central de los discos (las dimensiones del disco y de la horquilla del ARN eran adecuadas para este proceso). Se separan los nucleótidos de la región en doble hélice abriendo la molécula, cada vez más, a medida que se sitúa el ARN entre las dos capas



SECCION TRANSVERSAL DE UN DISCO, reconstruida a partir de los resultados de un análisis por difracción de rayos X a un poder de resolución de 2,8 angstroms. Las cintas dobladas indican las cadenas polipeptídicas que constituyen las subunidades proteicas. La estructura del disco en dos capas es evidente: las subunidades de los dos anillos contactan por una pequeña superficie cercana a la parte exterior del disco, pero se abren hacia el centro como un par de mandíbulas. Durante el ensamblaje del virus, el ARN se une dentro de las mandíbulas. Las líneas punteadas indican la fracción flexible de las cadenas de proteína que se extienden desde los loci de unión con el ARN. Al estar estos segmentos en movimiento no se ha podido determinar su estructura.

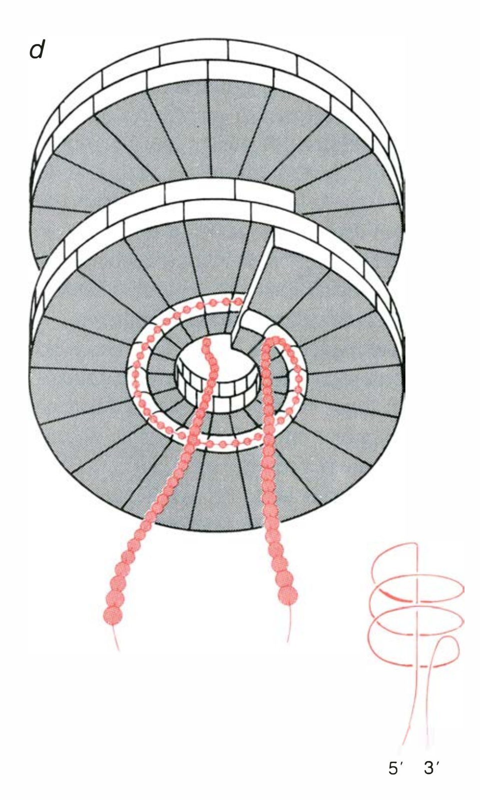
PARTICULAS VIRICAS EN CRECIMIENTO, que poseen dos terminaciones o "colas" del ARN en un extremo, como se muestra en esta micrografía electrónica hecha por Geneviève Lebeurier, de la Universidad de Estrasburgo. Hay pruebas de que el extremo corto del ARN se proyecta directamente fuera de la partícula, mientras que el largo se arrolla dentro de su hueco central. Los virus crecen por el extremo de la proteína opuesto a las colas del ARN.



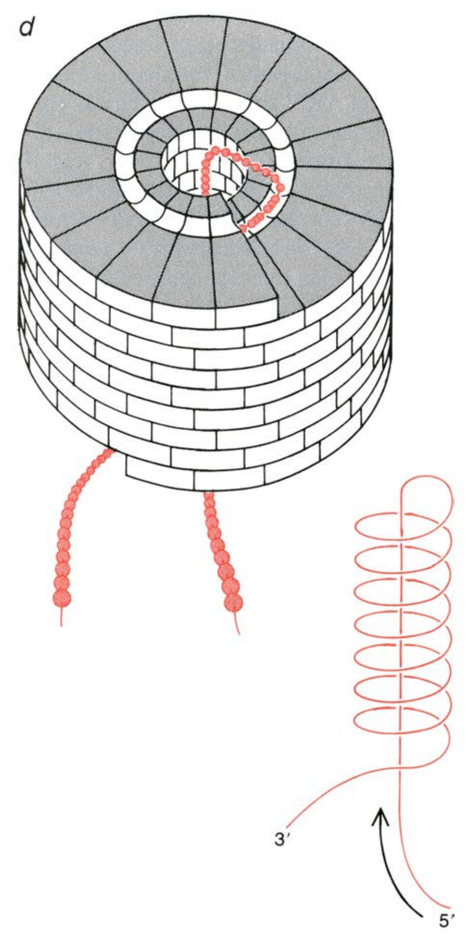
NUCLEACION del virus del mosaico del tabaco. Comienza con la inserción del lazo en horquilla formado por la región de iniciación del ARN vírico en el hueco central del disco proteico *(a)*. El lazo se intercala entre dos capas de subunidades y se une alrededor de la primera vuelta del disco, desapareando las bases de la cadena completa del ARN *(b)*. De esta forma provoca la dislocación del disco adoptando forma de "arandela de cierre" *(c)*. Esta transformación estructural cierra las mandíbulas formadas por los anillos de subunidades, capturando el ARN vírico dentro *(d)*. El complejo "arandela de cierre"–ARN

a
b
c
3′
5′
3′
5′
3′
5′

ELONGACION del virus. Ocurre por adición de discos proteicos. Como resultado del modo de iniciación, el extremo largo del ARN se arrolla a lo largo del hueco central del cilindro en crecimiento, formando un lazo móvil en el extremo de crecimiento de la partícula *(a)*. El lazo se inserta en el centro del disco siguiente y se une dentro de las mandíbulas abiertas de los anillos *(b)*. Esta interacción convierte al nuevo disco en una "arandela de cierre" helicoidal *(c)*.



facilita el inicio de la hélice. Los demás discos se van incorporando rápidamente al centro de nucleación del virus; de esta suerte, la hélice se desarrolla hasta alcanzar una longitud mínima de estabilización.



El disco transformado se añade sobre el cilindro, proporcionando dos nuevas espiras de hélice *(d)*. El proceso se repite hasta completar el ensamblaje.

del disco. Alguna característica aún desconocida de esta interacción provocaría entonces la conversión del disco a la forma de "arandela de cierre", sujetando el ARN entre los anillos de subunidades proteicas a modo de mandíbulas que se cierran.

Nuestra hipótesis acerca del mecanismo de iniciación conducía a un modelo que podía comprobarse experimentalmente. Si un fragmento de ARN se inserta en el centro del disco proteico iniciador, los dos extremos terminales de la cadena de ARN que se proyectan hacia fuera estarían asociados al extremo de la partícula vírica cilíndrica, desde donde comienza el crecimiento. Además esperábamos que el fragmento corto se proyectase directamente hacia fuera y que el largo (en el que tiene lugar la mayor parte del crecimiento) estaría arrollado en el orificio central del virus. Estas predicciones se han confirmado recientemente. El grupo de Hirth obtuvo micrografías electrónicas de partículas víricas en las cuales los dos filamentos de ARN pueden visualizarse proyectándose, en la mayoría de los cilindros a partir de un extremo [*véase la ilustración inferior de la página 27*].

En Cambridge, mediante microscopía electrónica de alta resolución, se han podido distinguir los dos extremos de la partícula vírica, confirmándose que el filamento largo del ARN está realmente arrollado a lo largo del cilindro en crecimiento. Preparamos también partículas víricas con el filamento largo de ARN, libre, alcalinizando la solución y separando la proteína desde un extremo de las partículas ensambladas: el filamento largo del ARN se proyectaba directamente desde la partícula, en lugar de arrollarse a lo largo del orificio central. Los cilindros parcialmente fragmentados crecían a una velocidad 10 veces inferior que los parcialmente ensamblados, lo cual demostraba la importancia de la forma de lazo.

Nuestro modelo de iniciación tenía una consecuencia importante. La configuración especial producida por la inserción del ARN arrollado en el orificio central del disco iniciador podía repetirse, por consiguiente, durante la adición de nuevos discos sobre el extremo de la hélice en crecimiento; el arrollamiento podía perpetuarse por adición de nuevas espiras del filamento largo de ARN sobre el hueco central de la partícula vírica en crecimiento. Así pues, la partícula vírica podía alargarse por un mecanismo similar al de la iniciación, sólo que, en lugar del lazo de iniciación específica, habría un lazo móvil de ARN en la zona principal del crecimiento de la partícula vírica. Este lazo se autoinsertaría en el hueco central del disco que se acopla a continuación provocando su conversión a la forma de "arandela de cie-

rre", continuándose el crecimiento de la partícula vírica. La geometría helicoidal del cilindro en crecimiento contribuye a facilitar la conversión, de suerte que la elongación sea suficientemente eficaz. Aparte de la obvia ventaja de liberar a la vez un grupo de 34 subunidades, este sistema de cubrir el ARN sería más eficaz frente a secuencias extrañas de nucleótidos que el modelo basado en la unión de subunidades individuales.

En la elongación de la partícula vírica no se requiere secuencias específicas de nucleótidos; en lugar de ello, la proteína debe ser capaz de cubrir cualquier secuencia de nucleótidos que se presente en el ARN. Como el filamento más largo del ARN queda cubierto rápidamente por la proteína, el cilindro de la partícula vírica sólo debe alargarse alrededor de la fracción del filamento corto de ARN, situado en el extremo opuesto del cilindro, para producir una partícula completa. Se ha determinado que el crecimiento en la dirección del filamento corto del ARN es más lento que en la dirección del filamento largo, pero hasta ahora la información a este respecto es limitada.

Se dispone ya de una prueba directa de que el virus del mosaico del tabaco crece principalmente por adición de bloques enteros de subunidades en forma de disco en lugar de por adición de subunidades individuales. En recientes experimentos con George P. Lomonossoff estudiamos extensamente el ARN en partículas víricas parcialmente ensambladas y protegidas de la digestión enzimática. Ello demostró que el ARN se protege y cubre en etapas de 50-100 nucleótidos correspondientes a una o dos espiras del ARN de la hélice vírica. Cuando el crecimiento está correctamente establecido, el tamaño secuencial puede ser de 100 nucleótidos, la cantidad de ARN asociada a un solo disco de proteína. Este descubrimiento es un punto de confirmación para la conclusión de que el agregado de discos está implicado no sólo en la iniciación vírica sino también en su elongación.

¿Cuál es el impedimento para que los discos de proteína formen una hélice alrededor de los ARN víricos bajo condiciones normales? Como hemos visto, la agregación de subunidades proteicas está controlada por el *p*H de la solución. Este control parece llevarse a cabo por la presencia, en cada subunidad, de grupos químicos aceptores de protones, verbigracia, dos grupos carboxilo muy próximos (—COOH). Uno de estos grupos en el disco, al *p*H de la célula huésped, se encuentra ionizado negativamente; en cambio, en la "arandela de cierre" de forma helicoidal se encuentran ionizados ambos. La repulsión electrostática entre los dos grupos dotados de carga negativa favorece la conformación del disco. No obstante,

en presencia de ARN vírico, se produce el enlace al disco proteico, suministrando suficiente energía libre para superar la repulsión electrostática a nivel de la "arandela de cierre". En este sentido, los grupos carboxilo actuan como un interruptor negativo que bloquee la formación de la hélice proteica en ausencia de ARN vírico. Además, sólo el ARN vírico está revestido porque sólo él tiene la secuencia de iniciación que puede comenzar el proceso de ensamblaje por conversión del primer disco de proteína en "arandela de cierre".

Hemos visto que las propiedades especiales del disco proteico constituyen la clave del mecanismo por el cual se ensambla el virus del mosaico del tabaco. Efectivamente, podría decirse que las subunidades proteicas están diseñadas para formar, no una hélice indefinida, sino una variante cerrada de dos capas —el disco— estable, que puede pasar a la forma helicoidal. Por tanto, el disco representa un subensamblaje intermedio adecuado para superar la dificultad termodinámica que comporta el inicio del crecimiento de la hélice. Simultáneamente, el disco proteico proporciona un mecanismo para el reconocimiento del ARN vírico (y el rechazo de los ARN extraños) al suministrar gran cantidad de puntos de unión que interaccionan con una secuencia específica de nucleótidos del ARN. En resumen el disco proteico satisface los requerimientos físicos para iniciar el crecimiento de la hélice de ARN y proteínas y los requerimientos biológicos para el reconocimiento específico del ARN vírico, es decir, actúa como un intermediario obligado en el ensamblaje del virus del mosaico del tabaco.

El desarrollo del agregado discoidal de la cubierta proteica y la configuración en horquilla del ARN para iniciar la hélice vírica era, al parecer, un sistema demasiado convincente para abandonarlo en favor de la elongación por el sistema de adición de subunidades sencillas. En consecuencia, los discos proteicos participan en el crecimiento de la hélice en la dirección principal de la elongación. Por otra parte, la partícula vírica debe también estar desensamblada para poder liberar el ARN vírico en la infección de la célula huésped. El desensamblaje probablemente se lleva a cabo por la renovación secuencial de subunidades individuales a partir de un extremo de la partícula vírica. Por ello, la construcción del virus no es consecuencia directa de un equilibrio bioquímico no balanceado, como sucedería si el desensamblaje fuera simplemente el proceso inverso del ensamblaje. En lugar de ello, ha evolucionado un mecanismo estructural intrincado, que proporciona al proceso una eficacia y seguridad cuyos fundamentos están actualmente dilucidados.

La óptica de rayos X de longitud de onda larga

Los rayos X empleados en cristalografía y radiografías médicas son "duros", de longitud de onda corta. Se está investigando la utilización de rayos X "blandos", de longitud de onda larga, en microscopía, astronomía y microelectrónica

Eberhard Spiller y Ralph Feder

Entre la radiación ultravioleta y los rayos X de longitud de onda corta se sitúa una región del espectro electromagnético que, durante mucho tiempo, se ha considerado de escaso interés: los rayos X "blandos", o de longitud de onda larga. Con anterioridad a la última década, los físicos habían trabajado poco con esta radiación, debido sobre todo a las dificultades que presenta su producción en el laboratorio. Por el contrario, los rayos X "duros", de longitud de onda corta, pueden obtenerse con gran facilidad. A lo largo de algo más de seis décadas, las especiales características que presenta su difusión y su poder penetrante se utilizaron para investigar la naturaleza de la materia y el interior del cuerpo humano. La cristalografía de rayos X ha contribuido sustancialmente a la comprensión de la estructura atómica de los sólidos. El análisis de la difracción, o la difusión, que sufren los rayos X duros al atravesar un cristal nos permite conocer la estructura geométrica de los átomos del cristal. Los rayos X duros han dado lugar también a la radiología médica.

A lo largo de los últimos 10 años, los aceleradores de partículas conocidos como sincrotrones han proporcionado una fuente inesperada de rayos X blandos, cuya intensidad es lo suficientemente alta como para hacerlos susceptibles de cualquier tipo de aplicación. Cuando los electrones se mueven por una trayectoria circular en los sincrotrones, con velocidades próximas a la velocidad de la luz, emiten abundantes rayos X blandos. Se ha demostrado que los rayos X blandos permiten analizar la estructura de objetos cuyo tamaño varían en una amplia gama: células vivas, el plasma caliente de las experiencias de fusión o la corona solar. (En estos dos últimos casos, la producción de rayos X corresponde a los propios fenómenos observados.) Todas estas aplicaciones dependen de la forma en que la materia emite y absorbe rayos X blandos. La absorción de rayos X blandos constituye también la base de la nueva técnica de litografía de rayos X, con la cual la densidad de los circuitos microelectrónicos trazados sobre una pastilla de material semiconductor resulta ser superior, al menos en dos órdenes de magnitud, a la que se obtiene utilizando métodos convencionales.

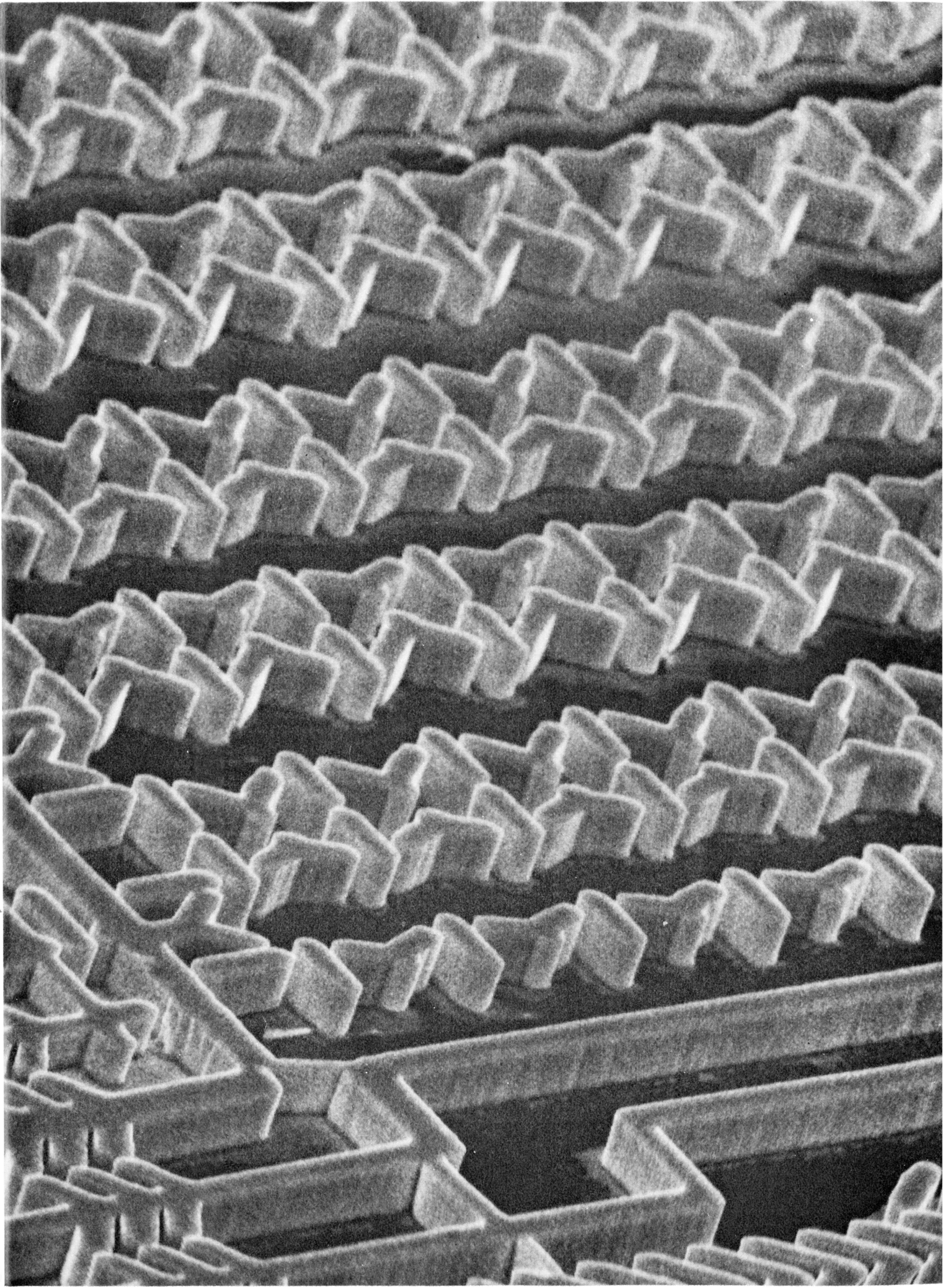
La absorción de rayos X por la materia se produce fundamentalmente en virtud del efecto fotoeléctrico. Cuando un fotón de rayos X colisiona con un átomo se libera uno de los electrones del átomo en cuestión, si la energía del fotón es lo suficientemente elevada como para superar a la energía de enlace del electrón. A cada uno de los electrones de un átomo corresponde una energía de enlace diferente: dicha energía es mayor para aquellos electrones que están situados más cerca de los núcleos atómicos, cargados positivamente.

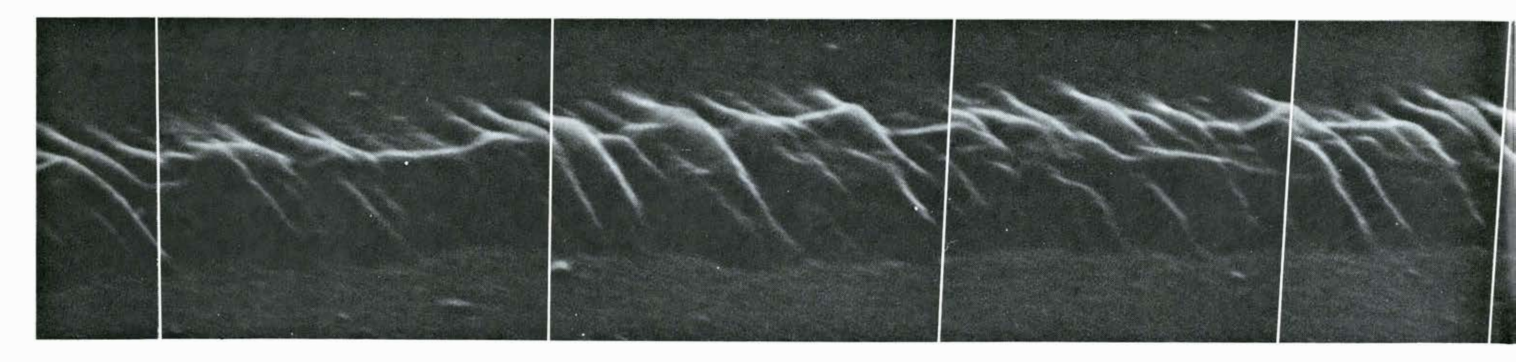
El hecho de que cada tipo de átomo presente una absorción característica, de acuerdo con las energías de enlace de sus electrones, permite determinar la composición de sustancias desconocidas bombardeándolas con rayos X y registrando las energías para las que las ondas resultan apreciablemente atenuadas [*véase la ilustración superior de la página 36*]. La atenuación que experimentan las ondas luminosas al atravesar un determinado material viene caracterizada por una magnitud denominada longitud de absorción, que para una longitud de onda dada es el espesor de material que produce una atenuación de la radiación igual al 37 por ciento de la intensidad incidente. En el caso de la luz visible, las longitudes de absorción de los diferentes materiales varían dentro de unos límites muy amplios. Para la mayoría de los metales, las ondas luminosas resultan totalmente absorbidas al atravesar un espesor inferior a los 1000 angstroms (un angstrom equivale a 10^{-7} milímetros). Por contra, en algunos vidrios, las ondas luminosas no resultan atenuadas de forma apreciable, ni siquiera al recorrer varios kilómetros de material.

Dado que la longitudd de onda es inversamente proporcional a la energía, los rayos X de longitud de onda corta son más energéticos que los de longitud de onda larga. En muchos casos, las ondas cortas son demasiado energéticas para interaccionar fuertemente con los electrones de un material; estas ondas son capaces de atravesar el material en cuestión sin resultar afectadas por las variaciones locales de su estructura atómica. Por su parte, las energías de las ondas más largas suelen ser del mismo orden que las de los electrones. El espectro de absorción de los rayos X blandos permiten calcular la distancia entre los átomos y las moléculas de sólidos y líquidos, con una precisión del orden de 0,01 angstroms.

Durante muchos años, los físicos han deseado construir un microscopio de rayos X que permitiera aprovechar la capacidad de los rayos X blandos para detectar estructuras de pequeño tamaño. La necesidad de un instrumento de este tipo resulta evidente. La resolución de los microscopios ópticos viene limitada por la longitud de onda relativamente grande de la luz visible. Aun cuando la resolución de los mi-

CIRCUITO MICROELECTRONICO, reproducido en la página opuesta a un tamaño 4690 veces mayor que el real. Se ha obtenido mediante la técnica de litografía con rayos X. Este método consiste en hacer llegar un haz de rayos X blandos hasta un polímero sensible a dicha radiación a través de una plantilla de oro. Las lineas del circuito tienen una anchura del orden del micrometro y una altura del orden de tres micrometros. Esta técnica litográfica de rayos X puede producir figuras con un elevado nivel de relieve.





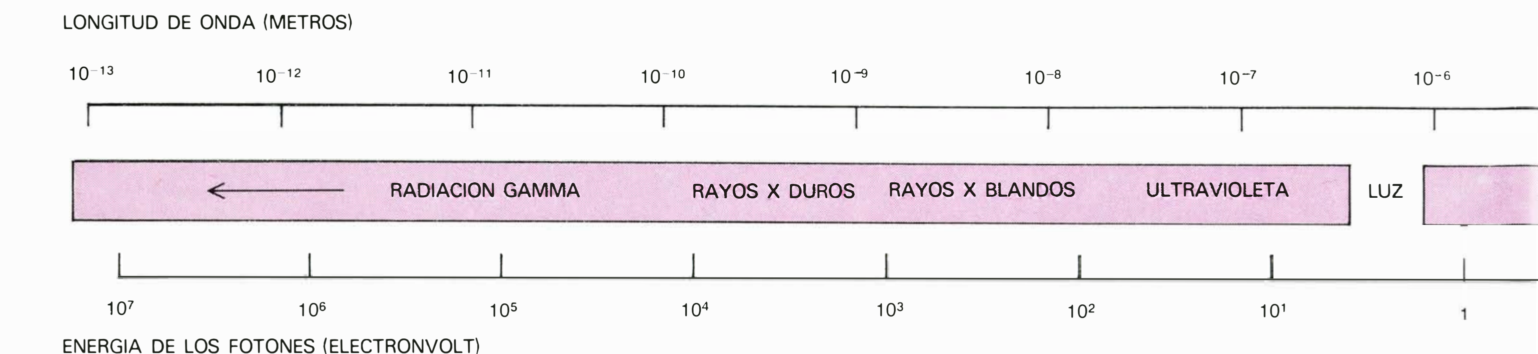
REPLICA POR RAYOS X de un cromosoma de la mosca de la fruta conocida con el nombre de *Drosophila*. Este duplicado se ha obtenido colocando el material objeto de estudio sobre un polímero sensible a los rayos X y exponiendo el conjunto a un haz de rayos X blandos cuya longitud de onda era de 44,8 angstroms. (Entre la radiación ultravioleta y los rayos X de longitud de onda corta se sitúa una región del espectro electromagnético que, durante mucho

croscopios de transmisión de electrones es mucho mayor, su poder penetrante es muy bajo y, en consecuencia, el uso de estos instrumentos está limitado a muestras muy delgadas. Por otra parte, en los microscopios de transmisión de electrones, las muestras están generalmente teñidas y montadas en una cámara de vacío. Este tipo de preparación, que altera las estructuras biológicas, no sería necesaria en la microscopía de rayos X. No obstante, la construcción de un microscopio de rayos X presenta enormes dificultades debido a los problemas que plantean dicha radiación en lo que respecta a la formación de las correspondientes imágenes.

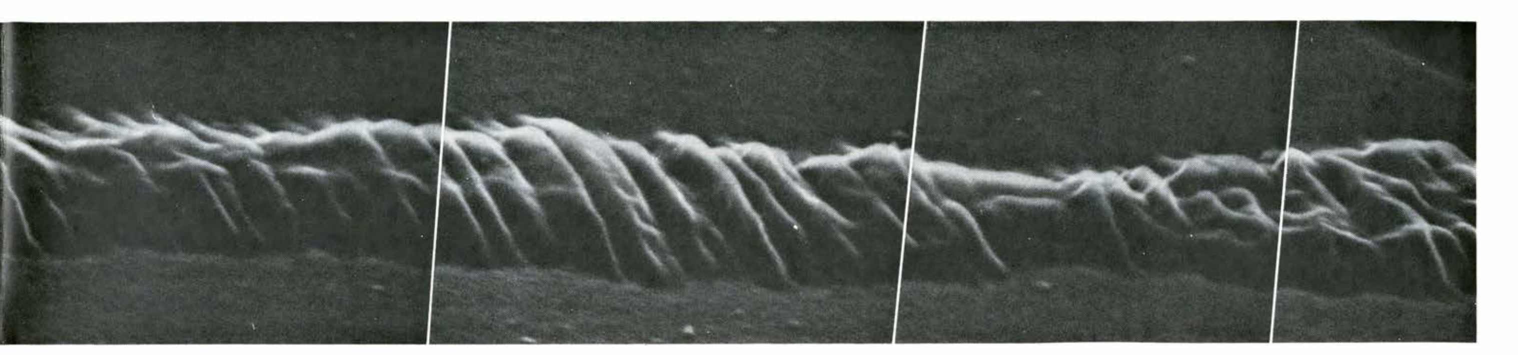
En efecto, las lentes ordinarias pueden focalizar la luz visible, pero no son capaces de focalizar los rayos X. Cuando las ondas de la radiación electromagnética, como la luz o los rayos X, atraviesan la materia, su velocidad es diferente de la que poseen en el vacío o en el aire y, como consecuencia, resultan refractadas o desviadas. La cuantía de la refracción depende tanto de la longitud de onda de la radiación como de la naturaleza de la materia. En el caso de la luz visible que pase a través del vidrio con el que se construyen las lentes o los prismas, este efecto es lo suficientemente importante como para permitir la focalización de las ondas luminosas retardando y refractando los frentes de onda, de forma tal que todas ellas converjan en un punto. Por ejemplo, una onda esférica divergente, procedente de una fuente luminosa puntual, se puede transformar mediante una lente en una onda esférica convergente sobre un punto imagen. La lente retarda los frentes de onda que la atraviesan por su centro más de lo que lo hace para los frentes de onda que atraviesan sus extremos, de forma tal que el tiempo que los diferentes frentes de ondas invierten en su recorrido desde el objeto hasta la imagen es el mismo para todas las trayectorias posibles. En el caso de rayos X blandos, a diferencia de lo que sucede con la luz visible, el efecto de retardo y refracción de la mayoría de los materiales es despreciable. El retardo y la refracción de los rayos X blandos, en una cuantía suficiente para conseguir su focalización, tan sólo se podría conseguir en algunos casos muy concretos, y aún entonces a costa de utilizar lentes muy gruesas. Sin embargo, los rayos X blandos no serían lo suficientemente energéticos como para poder atravesar dichas lentes gruesas; las correspondientes ondas resultarían absorbidas en su totalidad por la lente antes de que llegaran a emerger en ella. En el caso de rayos X duros, a pesar de su alto poder penetrante, la situación de focalización es igualmente mala, debido a la imposibilidad de obtener una deflexión apreciable, aun cuando se recurra a la utilización de lentes muy gruesas.

El método más sencillo y más adecuado para producir una imagen con rayos X es el de la microscopía de rayos X por contacto. Esta técnica permite alcanzar una resolución sustancialmente mejor que la de un microscopio óptico; se basa en la obtención de una imagen de la muestra en forma de silueta. El tamaño y composición de la muestra y de sus detalles más pequeños determinan el valor de las longitudes de onda a utilizar. La elección de la longitud de onda óptima es una cuestión de compromiso entre la máxima penetración y el máximo contraste posibles. El espesor de la muestra impone la utilización de rayos X duros capaces de atravesarla, pero la observación de los detalles finos de dicha muestra exige el empleo de rayos X blandos con el fin de que sean suficientemente absorbidos y produzcan un contraste adecuado. La penetración de objetos gruesos puede hacer necesaria la utilización de longitudes de onda del orden de los dos angstroms; por su parte, la obtención de un buen contraste en los detalles de pequeño tamaño puede exigir el uso de longitudes de onda superiores a los 100 angstroms.

Detrás de la muestra en estudio se coloca una pantalla o una película con mi-



EL ESPECTRO ELECTROMAGNETICO representa a los diferentes tipos de radiación ordenados según las respectivas longitudes de onda y energías de sus fotones o cuantos de radiación. La longitud de onda y la energía de un fotón son dos magnitudes relacionadas entre sí en razón inversa. Los rayos X ocupan la



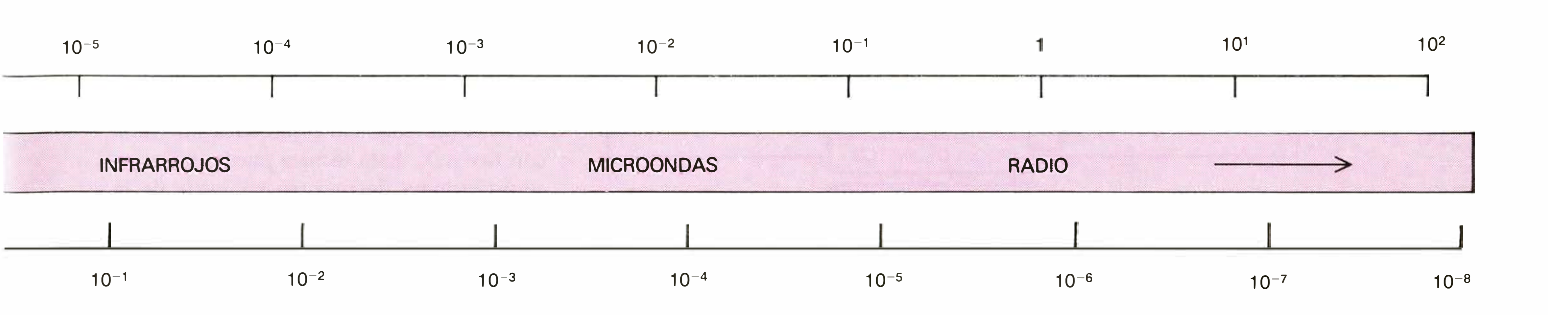
tiempo se ha considerado de escaso interés: los rayos X blandos, o de longitud de onda larga.) La atenuación experimentada por la radiación depende de la naturaleza de la materia presente en el cromosoma. Cuando el polímero se sumerge en un disolvente adecuado, las regiones que han resultado menos expuestas a los rayos X se disuelven con más dificultad que las regiones más expuestas a dicha radiación. La preparación fue realizada por John Sedat.

sión de registrar la intensidad de los rayos X que la atraviesan. Como hemos dicho anteriormente, la intensidad disminuye de forma acusada si la energía de las ondas es igual a la energía necesaria para liberar a los electrones de los respectivos átomos. En consecuencia, la atenuación en cuestión nos permitirá conocer la composición de un objeto. Por ejemplo, la energía de los rayos X cuya longitud de onda es de 44,8 angstroms corresponde a la energía necesaria para extraer un electrón interno de un átomo de carbono. Si un objeto compuesto fundamentalmente de carbono se expone a un haz de rayos X cuyas longitudes de onda son ligeramente mayores que 44,8 angstroms, es decir, rayos X cuyas energías resultan demasiado bajas como para extraer los electrones más internos, dicho objeto difícilmente absorberá tales ondas y, por consiguiente, su imagen ofrecerá poco contraste. Si el mismo objeto se expone a rayos X cuyas longitudes de onda son iguales o ligeramente menores que 44,8 angstroms, la correspondiente absorción será bastante mayor y su imagen presentará mucho más contraste. La diferencia entre estas dos imágenes, la una obtenida con una longitud de onda ligeramente superior a la del "límite de absorción" de un elemento y la otra obtenida con una longitud de onda ligeramente inferior a dicho límite de absorción, permitiría conocer la distribución de dicho elemento en el objeto considerado.

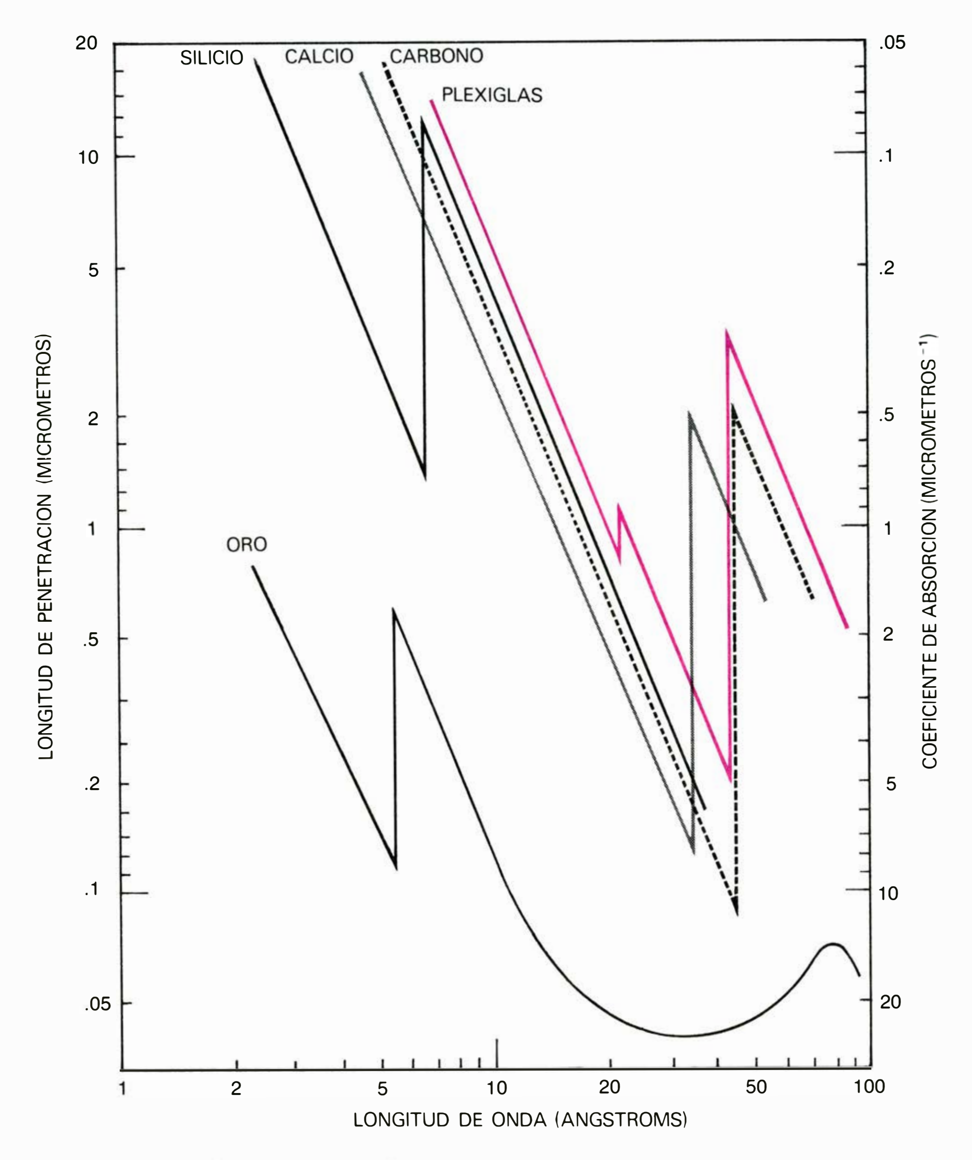
La microscopía de rayos X por contacto presenta una limitación: el tamaño de la imagen no supera el del objeto. Hasta una fecha relativamente reciente, la imagen registrada sobre una película fotográfica tenía que observarse a través del microscopio óptico. Esto significaba que la resolución de dicha imagen venía condicionada por la resolución obtenida con la luz visible, una limitación que se suponía que la microscopía de rayos X debería superar. A pesar de todo, esta técnica de investigación es de gran utilidad debido a la penetración y contraste de los rayos X.

En 1972, David L. Spears y Henry I. Smith, del Laboratorio Lincoln del Instituto de Tecnología de Massachusetts, modificaron la técnica de contacto de la microscopía de rayos X al objeto de que pudiera aplicarse a la fabricación litográfica de circuitos microelectrónicos. Este proceso de rayos X –todavía en fase de desarrollo a nivel de laboratorio– puede facilitar la transferencia fiel de los intrincados detalles de un circuito de gran tamaño a una escala microelectrónica. La litografía por haz de electrones es la única técnica de grabado que existe en la actualidad capaz de reproducir tales circuitos. El tamaño de los detalles más pequeños que la fotolitografía clásica con radiación ultravioleta puede formar viene condicionado por la longitud de onda de la radiación utilizada. En teoría, este tamaño resulta ser del orden de un micrometro (10^{-3} milímetros), aunque en la práctica sólo se han reproducido estructuras cuyas dimensiones son de varios micrometros. Puesto que las longitudes de onda de los rayos X son del orden de nanómetros (un nanómetro equivale a 10^{-6} milímetros), su utilización ofrece la perspectiva de una resolución mucho mayor. Esta técnica ha permitido reproducir estructuras cuyas dimensiones no llegaban a la décima de micrometro.

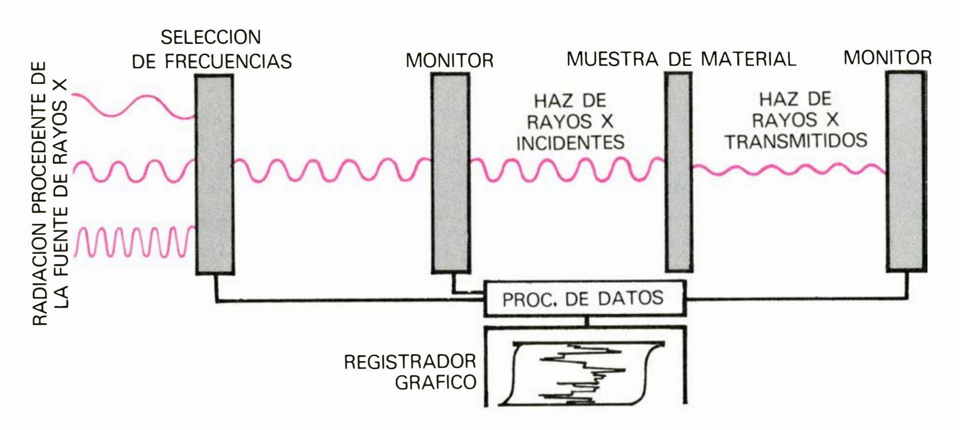
En litografía con rayos X los circuitos microelectrónicos se construyen capa a capa sobre un soporte especial (oblea) dotado de un montaje de pastillas. El proceso consiste en exponer dicha oblea a la radiación y en sumergirla en una serie de baños alternativos de disolventes o ácidos. El soporte u oblea está recubierto originalmente con un polímero orgánico sensible a los rayos X. Este recubrimiento se aplica colocando una gota de una disolución del polímero sobre la superficie de la oblea. A continuación, el soporte se hace girar rápidamente. Este movimiento produce la dispersión de la gota y la evaporación del disolvente, con lo cual dicha sus-



región situada entre los rayos ultravioleta de longitud de onda más corta y los rayos gamma de longitud de onda más larga. Esta radiación se produce con gran facilidad en los sincrotrones. En la actualidad muchos de estos aceleradores se construyen específicamente con el fin de producir rayos X blandos.



ESPECTROS DE ABSORCION de rayos X blandos para diferentes materiales. La longitud de penetración, medida aquí en micrometros, representa el espesor de material que produce una atenuación de la radiación de una determinada longitud de onda igual al 37 por ciento de su intensidad incidente. Al aumentar la longitud de onda (es decir, al disminuir la energía), la longitud de penetración disminuye. El coeficiente de absorción, igual a la inversa de la longitud de penetración, proporciona una medida de la cantidad de radiación que absorbe el material en cuestión. Siempre que la energía de los rayos X sea mayor que la energía necesaria para liberar a los electrones atómicos, se producirá un aumento de la absorción. Estas energías se ponen de manifiesto aquí en forma de ciertas discontinuidades conocidas con el nombre de límites de absorción. Por ejemplo, el límite de absorción que se observa en el espectro del carbono para 44,8 angstroms corresponde a la energía necesaria para liberar uno de los electrones más internos del mismo.



ESQUEMA DE UN DISPOSITIVO EXPERIMENTAL para la medición de la absorción de rayos X. En primer lugar, el haz de rayos X compuesto por diferentes longitudes de onda pasa a través de un sistema capaz de seleccionar aquellos rayos X cuya frecuencia o energía tienen un determinado valor. La atenuación de los rayos X que atraviesan a continuación el material objeto de estudio se determina comparando la intensidad del haz incidente con la intensidad del haz transmitido. (Ilustraciones de Adolph E. Brotman.)

tancia queda adherida a la superficie de la oblea en forma de una película homogénea y muy delgada.

El soporte recubierto por el polímero se somete a un haz de rayos X que atraviesa una plantilla en la que se ha grabado el circuito que se desea reproducir. El circuito patrón está constituido por un material pesado, tal como el oro, capaz de absorber una fracción elevada de los rayos X incidentes; en cambio, el substrato de la plantilla está constituido por sustancias ligeras, que son atravesadas con facilidad por los rayos X. La longitud de onda de los rayos X utilizados en litografía varía entre 4 y 50 angstroms. El espesor de las plantillas (50 micrometros) permite el paso de rayos X cuya longitud de onda sea inferior a los 4 angstroms. El uso de plantillas todavía más delgadas que éstas posibilita la transmisión de rayos X cuyas longitudes de onda pueden llegar a alcanzar los 50 angstroms. Como veremos más adelante, la utilización de estas plantillas presenta grandes ventajas en los trabajos de alta resolución.

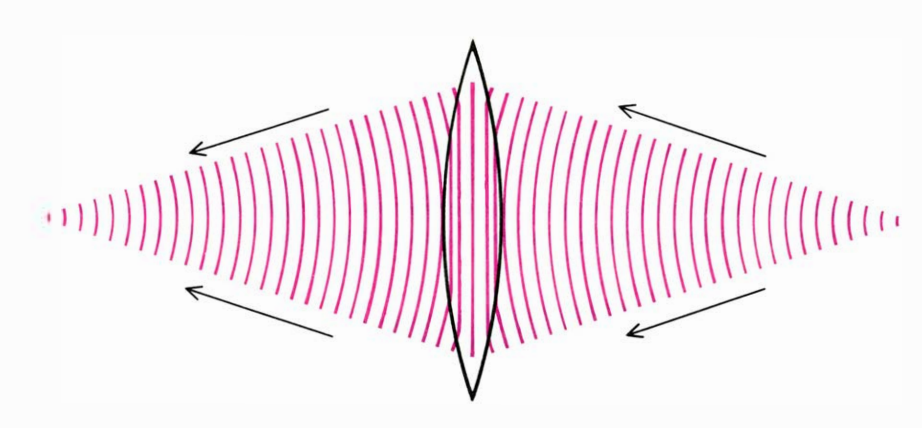
La propiedad clave de esta capa protectora de rayos X radica en el hecho de que, tras ser sometido a una irradiación con rayos X, la velocidad con que el polímero se disuelve en ciertos disolventes resulta alterada. Concretamente, cuando se irradia una oblea con rayos X a través de una plantilla y a continuación se sumerge en un disolvente adecuado, sólo se disolverán aquellas partes que corresponden a las porciones transparentes de la plantilla. En consecuencia, el circuito grabado en la plantilla queda impreso sobre la película de polímero. La última etapa de este proceso de litografía consiste en la transferencia del circuito grabado desde la película de polímero al propio soporte. Esta operación se puede llevar a cabo de varias maneras diferentes. Por ejemplo, cuando una oblea de silicio se somete a un baño de ácido fluorhídrico, resulta atacada en todos aquellos lugares que no están recubiertos por el polímero y, en consecuencia, la imagen del circuito queda grabada sobre el soporte. Hay que repetir todo este proceso de baños e irradiaciones para cada una de las capas del circuito.

Los polímeros sensibles a los rayos X son tan importantes en la microscopía con rayos X por contacto como en la litografía con rayos X. Esta técnica puede utilizarse como sistema de registro en lugar de la película fotográfica. La solubilidad de una capa de material polímero, colocada tras una muestra u objeto, será mayor en aquellos puntos a los que la radiación llegue con más intensidad. Cuando la capa en cuestión se sumerja en un disolvente adecuado, se disolverá selectivamente,

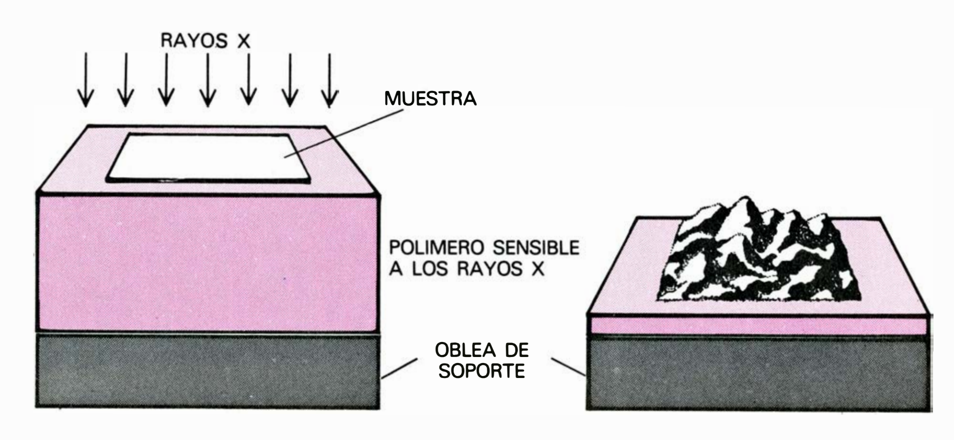
dando lugar a una imagen en relieve del objeto, en la que las zonas más altas del relieve corresponderán a aquellas regiones para las que la absorción es más alta. La topografía de la superficie del polímero revelado se puede inspeccionar con la ayuda de un microscopio electrónico de barrido, cuya resolución es mucho mayor que la del microscopio óptico.

El metacrilato de polimetilo (plexiglás) es uno de los polímeros utilizados en esta técnica con rayos X. Con este material se alcanza una resolución extraordinariamente buena: 50 angstroms para una longitud de onda de 50 angstroms. El empleo de longitudes de onda más cortas todavía no permite mejorar esta resolución, debido a que tales radiaciones no sólo alteran la sensibilidad del material sobre el que inciden directamente sino también la del material próximo. La razón fundamental de este hecho puede explicarse de forma muy simple. El fotón energético de un rayo X duro que haya conseguido atravesar el objeto penetrará a través del polímero hasta que produzca la extracción de un electrón atómico. La liberación de un electrón da lugar siempre a un cambio local en las propiedades químicas del polímero, tales como la ruptura de un enlace en una cadena del polímero. En efecto, dado que la energía que adquiere el electrón es mucho mayor que la que se necesita para liberarlo del átomo, dicho electrón cederá la energía en exceso en colisiones con otros átomos, produciendo así la liberación de nuevos electrones.. A su vez, estos electrones liberarán todavía más electrones y el proceso continuará hasta que la energía de los electrones libres sea menor que la energía de enlace de los electrones ligados en una cadena del polímero.

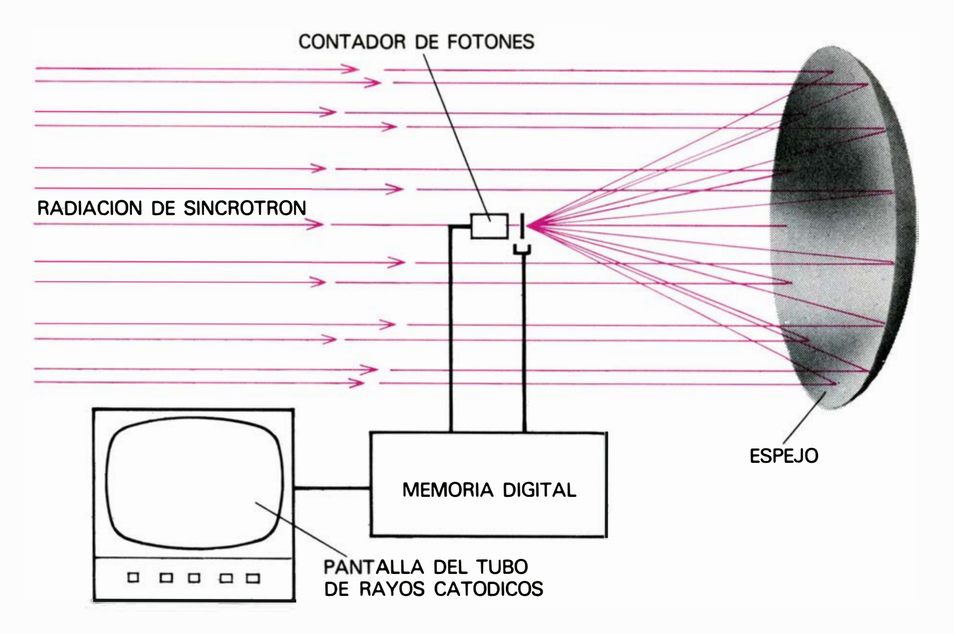
De este modo, la energía de un fotón de rayos X de longitud de onda corta se distribuirá, entre muchos electrones del metacrilato de polimetilo, en una región específica situada alrededor del átomo que absorbió originalmente el fotón de los rayos X. La energía de un fotón de rayos X blandos libera un número considerablemente reducido de electrones dentro de un alcance, en proporción, menor. Esto significa que un fotón de rayos X duros altera la solubilidad de una zona del polímero de mayor tamaño que la que resulta afectada por un fotón de rayos X blandos; en consecuencia, los relieves producidos por los rayos X blandos presentan mayor resolución. El límite de resolución de los rayos X cuya longitud de onda es de 50 angstroms es de este mismo orden de magnitud: 50 angstroms (alcance de los electrones secundarios liberados por dicha radiación). La utilización de longitudes de onda todavía mayores, con el fin de disminuir dicho alcance, no proporciona una mayor



LAS LENTES DE VIDRIO pueden focalizar a la luz pero no a los rayos X. La presente figura ilustra en qué forma una onda luminosa esférica divergente se convierte en convergente gracias a una lente. El retraso de los frentes de onda que atraviesan a la lente por su centro es mayor que el de los frentes que la atraviesan por sus extremos; así pues, la luz tarda igual en llegar del objeto a la imagen para los diferentes recorridos.



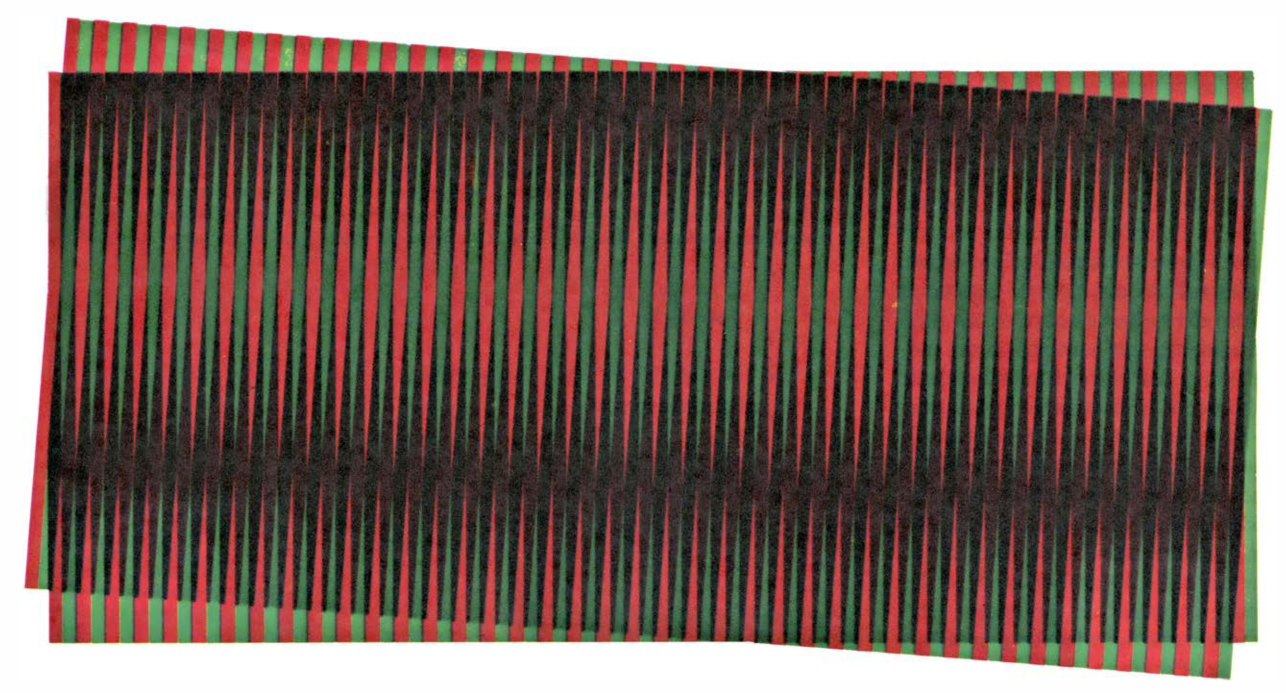
EN LA LITOGRAFIA de circuitos microelectrónicos y la microscopía de réplicas se utiliza un polímero sensible a los rayos X. La solubilidad de una lámina de dicho polímero colocada tras una muestra (*izquierda*) varía de un punto a otro de acuerdo con la cantidad de radiación que haya recibido. Cuando la lámina en cuestión se sumerge en un disolvente se disuelve selectivamente, dando lugar a una imagen en relieve de la muestra: las zonas de relieve más alto corresponden a las regiones de absorción mayor (*derecha*).



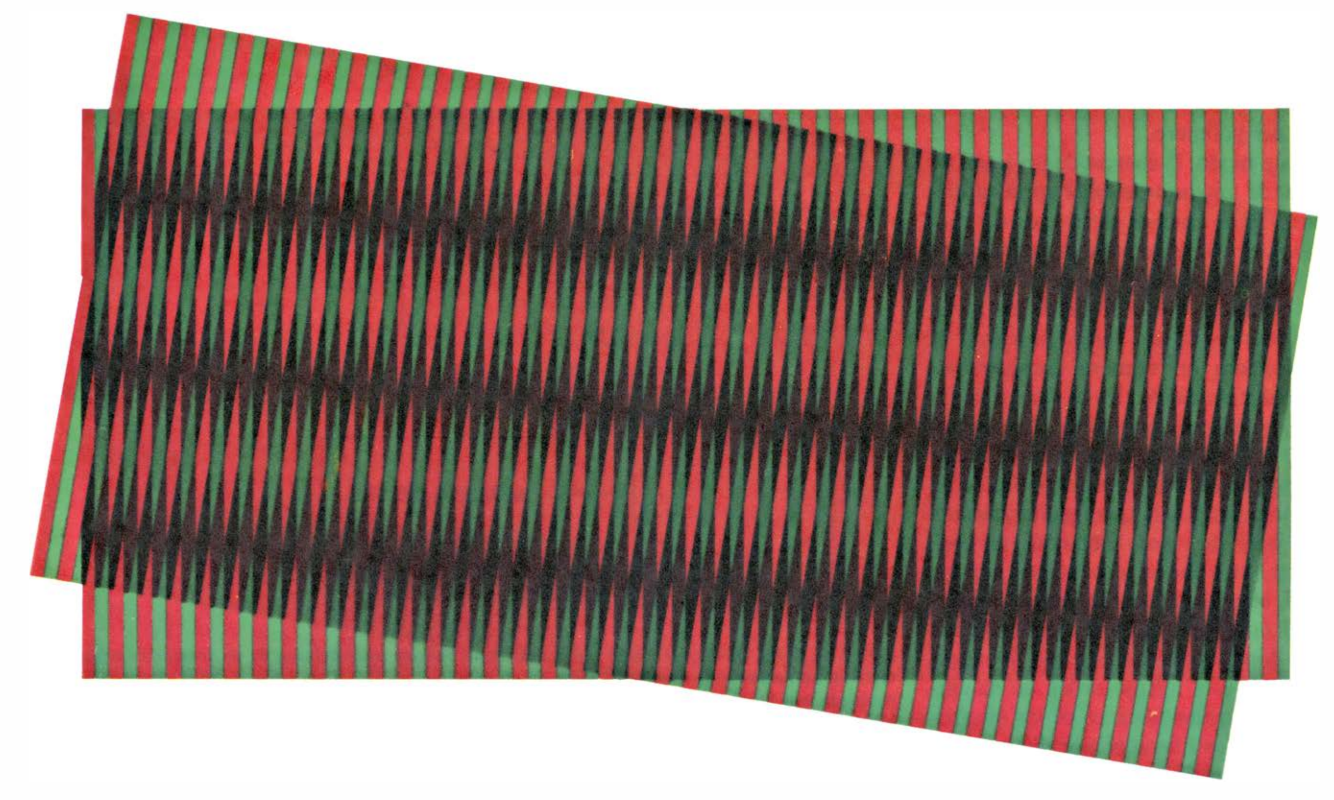
LOS MICROSCOPIOS DE RAYOS X del futuro podrían estar dotados de un sistema de registro consistente en un contador de fotones en lugar de un polímero sensible a los rayos X. Si el microscopio estuviera equipado con un elemento de focalización tal como un espejo, las imágenes que proporcionaría serían de idéntica calidad que las que se obtienen con un microscopio de rayos X por contacto, aunque presentaría la ventaja de utilizar una dosis de radiación cien veces menor. Cabe recordar que menos radiación significa menor daño en la muestra. La intensidad de los rayos X que atravesaran la muestra en cuestión se podría registrar en una memoria digital. Las características de la absorción producida por la muestra en estudio se podrían estudiar fácilmente proyectando la correspondiente imagen en una pantalla de televisión. El almacenamiento digital de esta imagen facilitaría el subsiguiente análisis cuantitativo del espectro electromagnético.

resolución debido a que entran en juego los efectos de difracción. En otras palabras, los 50 angstroms citados constituyen un valor óptimo de la resolución para el polímero en cuestión.

La microscopía electrónica presenta un poder de resolución mayor que el microscopio de contacto con rayos X debido a que los electrones pueden tener longitudes de onda más cortas que los rayos X blandos. Sin embargo, resulta ventajoso hacer incidir un haz de electrones sobre la réplica de un objeto obtenida mediante la técnica de rayos X en lugar de hacerlo directamente sobre el propio objeto. En primer lugar, la microscopía de rayos X es capaz de poner de manifiesto la estructura interna de la muestra, cosa que para los electrones resulta difícil. En segundo lugar, los rayos X permiten examinar objetos vivos. El éxito de la microscopía de



AL COMBINAR DOS ONDAS PLANAS de la misma amplitud se obtiene una figura de interferencia. En la presente ilustración, cada una de las dos ondas consideradas está representada por una serie de lineas rojas y verdes alternadas, correspondiendo respectivamente a otros tantos valles y crestas. Se ponen de manifiesto también una serie de puntos cuya intensidad es máxima, llamados antinodos, y otra serie de puntos cuya intensidad es mínima, llamados nodos. Los nodos corresponden a aquellas zonas obscuras en las que las crestas de una de las ondas planas coinciden con los valles de la otra onda. Los antinodos están marcados en rojo intenso (en las regiones en que los valles de las dos ondas coinciden) o en verde intenso (en las regiones en que las crestas de las dos ondas coinciden). Esta figura de interferencia es una onda estacionaria: tanto los nodos como los antinodos permanecen siempre en la misma posición.

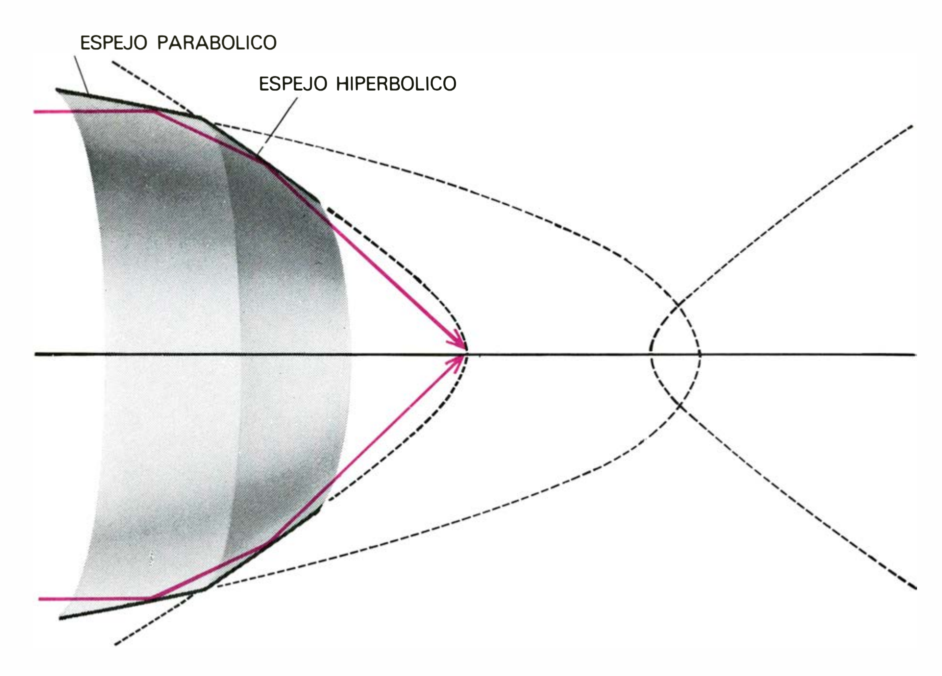


LA DISTANCIA entre los nodos y la distancia entre los antinodos disminuye al aumentar el ángulo que forman entre sí las respectivas ondas planas. La superficie de un espejo corresponde a un nodo en la figura de interferencia producida por la onda incidente y a reflejada. (Ilustraciones de los autores.)

contacto con rayos X ha reducido la necesidad de un microscopio de rayos X que permitiera ampliar las imágenes obtenidas directamente con rayos X. Dado que se ha conseguido ya una resolución próxima al límite impuesto por los efectos de difracción, no existe posibilidad alguna de que un microscopio de rayos X dotado con elementos de focalización alcance una resolución mucho mayor.

Los dispositivos de focalización de rayos X todavía son necesarios, pero por otras razones. Al facilitar el control de los haces de rayos X, los elementos de focalización simplificarían enormemente la construcción de muchos instrumentos científicos. Por otro lado, sin elementos de focalización sería imposible hacer observaciones de rayos X en astronomía. Estos dispositivos se mostrarían ventajosos también en microscopía de rayos X, debido a que su utilización reduciría la cantidad de radiación que se necesita para atravesar la muestra objeto de estudio. Cualquier radiación que ofrezca un elevado poder de resolución daña a los objetos sobre los que incide. De acuerdo con los cálculos de David Sayre y colaboradores, bajo condiciones óptimas de microscopía, el daño que causan los rayos X blandos es ligeramente menor que el de los electrones. Sin embargo, esta ventaja entra en juego sólo sobre la base de que toda la radiación que haya atravesado y dañado a una muestra dada sea utilizada para analizarla. Este no es el caso de la microscopía de contacto con rayos X, puesto que el polímero empleado en ella absorbe tan sólo una pequeña fracción de los fotones de rayos X incidentes (inferior al 1 por ciento para la resolución máxima). La mayoría de los fotones que atraviesan la muestra no contribuyen a la formación de la imagen. Si los microscopios de observación de rayos X se pudieran dotar de elementos de focalización, serían capaces de proporcionar imágenes de idéntica calidad que las obtenidas con esta técnica con un daño producido por la radiación cien veces mayor.

En los microscopios de rayos X del futuro, el sistema de registro no debería ser una película fotográfica o un polímero sensible a los rayos X, sino un contador de fotones. Equipado con una memoria digital, el contador de fotones registraría la intensidad transmitida por un haz de rayos X que hubiera barrido la muestra y proyectaría una imagen que recogiera las características de absorción de dicha muestra sobre una pantalla de televisión. El almacenamiento digital de la imagen facilitaría su análisis ulterior. Así, los microscopistas podrían obtener una imagen de la distribución de un elemento, tal como el calcio, en una determinada muestra estudiando la diferencia entre dos imágenes de la pantalla de televisión, una de ellas correspondiente a una longitud de onda ligeramente superior al límite de absorción de dicho elemento y la otra para una longitud de onda ligeramente inferior a dicho límite. La obtención de esta misma sustracción, a partir de dos imágenes grabadas sobre un polímero sensible a los rayos X, sería muy laboriosa. En el año 1972, Paul Horowitz y John A. Howell, de la Universidad de Harvard, construyeron una primera versión de un microscopio de observación de rayos X, constituido fundamentalmente por un orificio iluminado por la radiación de un sincrotrón que permitía definir la superficie de una muestra expuesta a la misma. El diámetro del orificio condiciona el límite de resolución a un micrometro; este valor resultaría considerablemente mejorado si se utilizaran unos dispositivos de focalización adecuados.

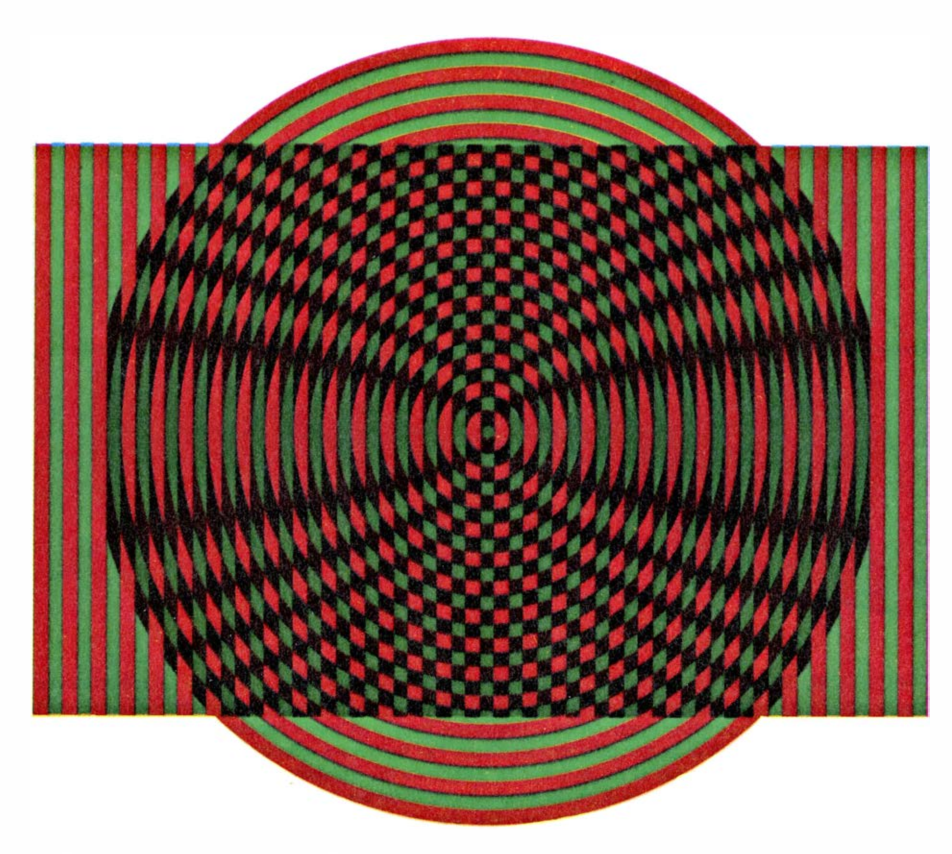


TELESCOPIO DE RAYOS X del tipo Wolter instalado a bordo de los satélites Skylab. La radiación que llega a este instrumento bajo un ángulo de incidencia rasante de 0,916 grados resulta reflejada por unas superficies de forma hiperbólica y parabólica y finalmente llega a un punto imagen. En la presente figura dicho ángulo de incidencia se ha dibujado muy ampliado. Las superficies reflectoras se han representado en forma de líneas discontinuas con el fin de poner de manifiesto las secciones cónicas de dichas superficies. Este telescopio puede focalizar rayos X cuyas longitudes de onda son mayores que seis angstroms con una resolución del orden de un segundo de arco, un valor que resulta 1000 veces peor que el límite teórico.

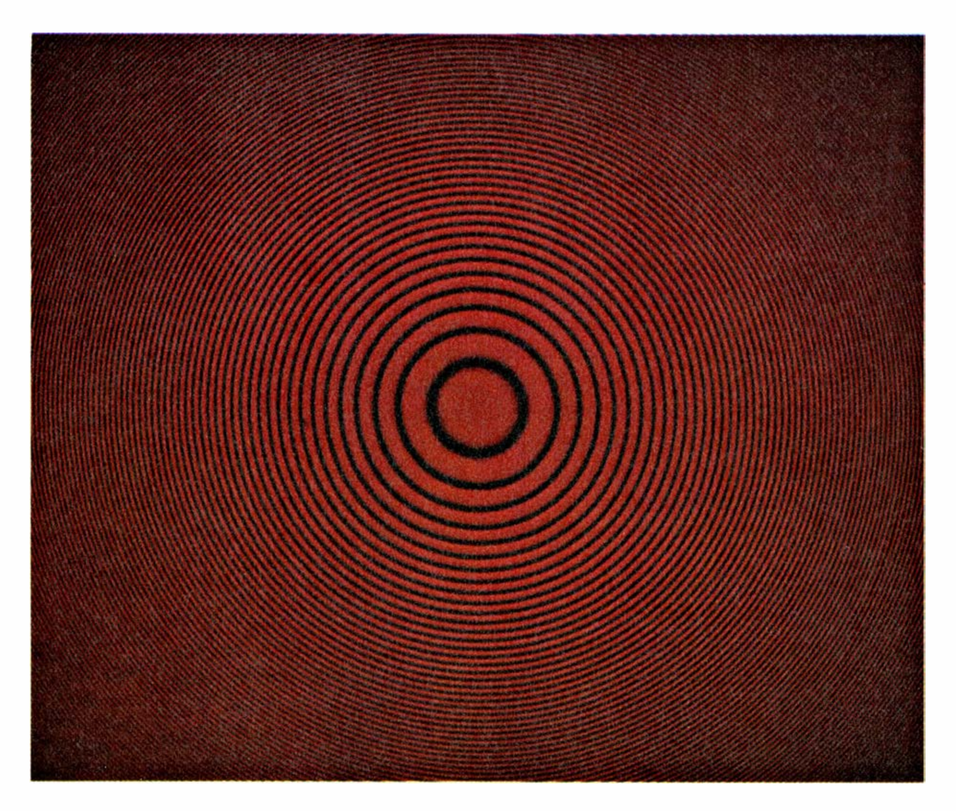
En su búsqueda de elementos de focalización de alta calidad, los físicos han dirigido la atención hacia los espejos de incidencia rasante. Recientemente se ha empezado a trabajar también con placas de zona y espejos de incidencia normal. Para comprender el funcionamiento de estos dispositivos es necesario explicar brevemente la mecánica ondulatoria que subyace a las correspondientes imágenes. Cuando se cruzan dos o más ondas, se produce una interferencia o combinación de las dos ondas, dando lugar a un campo ondulatorio cuya amplitud en cualquier punto es igual a la suma de las amplitudes de las ondas componentes en ese punto [*véanse las ilustraciones de la página opuesta*]. Allí donde las ondas están exactamente en fase (es decir, allí donde las crestas coinciden con las crestas y los valles coinciden con los valles), la amplitud aumenta; allí donde las ondas están exactamente fuera de fase (las crestas coinciden con los valles), la amplitud disminuye.

Cuando las ondas se combinan entre sí para dar lugar a una onda estacionaria, se crea una figura de interferencia, caracterizada por la existencia de ciertos puntos en los que la intensidad es máxima, llamados antinodos, y ciertos puntos en los que la intensidad es mínima, llamados nodos. La intensidad de los nodos será nula si las dos ondas que interfieren tienen la misma amplitud. El término onda estacionaria se refiere al hecho de que las posiciones de los antinodos y los nodos permanecen estacionarias, incluso en el caso de que las ondas componentes que generaron dicha onda se muevan con la velocidad de la luz. Puesto que los antinodos son los puntos de intensidad máxima, una fotografía de la figura de interferencia aparecerá luminosa en los antinodos y obscura en los nodos.

En muchas aplicaciones ópticas se explota la capacidad de las figuras de interferencia para reconstruir las ondas originales. Cuando un retículo en forma de



LOS NODOS DE LA FIGURA DE INTERFERENCIA, formada por una onda esférica y una onda plana, presentan una configuración parabólica. La sección transversal de esta figura está constituida por una serie de círculos concéntricos. Esta figura, conocida por placa de zonas de Fresnel, se reproduce abajo.



PLACA DE ZONAS DE FRESNEL, que consiste en una serie de círculos concéntricos que se hacen paulatinamente más delgados y se presentan cada vez más juntos a medida que sus radios aumentan. Esta figura representa la sección transversal de la figura de interferencia que se reproduce arriba. Cuando una onda plana de rayos X llega a una placa de zonas de Fresnel resulta difractada en forma de una onda esférica convergente sobre un punto imagen. La resolución de una placa de zonas de Fresnel es igual a la anchura de su zona más estrecha, es decir, equivale a la separación mínima entre dos círculos concéntricos.

figura de interferencia de dos ondas se ilumina con una de las ondas, se obtiene la otra onda. Este fenómeno de reconstrucción, que constituye el fundamento de la holografía, es la base de un intento reciente para conseguir focalizar a los rayos X. El retículo conocido como placa de zonas de Fresnel está formado por una onda plana y una onda esférica [*véanse las ilustraciones de la izquierda*]. Cuando la placa de zonas se ilumina con una onda plana de rayos X se produce una onda esférica convergente. En consecuencia, la placa de zonas permite focalizar a los rayos X sobre un punto.

La placa de zonas está constituida por una serie de círculos concéntricos que se van haciendo paulatinamente más delgados y que se presentan más próximos entre sí a medida que sus radios aumentan. Con una de estas placas se puede alcanzar una resolución igual a la anchura de la zona más pequeña o espacio más estrecho entre dos círculos consecutivos. Sin embargo, para obtener este resultado es necesario que se haya fabricado la placa de zonas mediante un proceso cuya resolución sea comparable a la que se pretende lograr. Los sistemas productores de haces de electrones pueden proporcionar un poder de resolución adecuado a este fin. En los últimos 10 años, un grupo de fisicos de la Universidad de Tübingen han utilizado esta técnica para construir placas de zonas. Aunque se han obtenido placas de zonas de menos de 300 angstroms, en la práctica ninguna ha aportado una resolución superior a la del microscopio óptico. La mejor resolución de un microscopio de rayos X equipado con una placa de zonas como sistema de focalización es de unos 0.5 micrometros, es decir, un valor cinco veces mayor que el límite teórico (0,1 micrometros); este poder de resolución se alcanzó en un instrumento construido en la Universidad de Göttingen por E. Niemann, D. Rudolph y G. Schmahl. Indudablemente, a medida que las técnicas de fabricación de placas de zonas se mejoren en los años próximos, su resolución se acercará a dicho límite teórico.

La principal desventaja de las placas de zonas como dispositivo productor de imágenes es que exigen el uso de radiación monocromática. La longitud focal de una placa de zonas es inversamente proporcional a la longitud de onda de la radiación incidente; en consecuencia, tan sólo una de las longitudes de onda de un haz de radiación policromático formará una imagen nítida. Esto significa que las placas de zonas no pueden sacar partido del amplio espectro de los rayos X que generan los sincrotrones. No obstante, si en el futuro se llegara a desarrollar fuentes intensas de rayos X blandos monocromáticos, las pla-

cas de zonas podrían ser los dispositivos de focalización ideales.

Al contrario de lo que sucede con las placas de zonas, los espejos sí pueden focalizar diferentes longitudes de onda simultáneamente. Desde el punto de vista ondulatorio, la superficie de un espejo perfecto puede describirse como una superficie que coincide con un nodo de la figura de interferencia producida por las ondas que inciden sobre el espejo y las reflejadas en él. En otras palabras, si la reflectividad del espejo es del 100 por ciento (lo cual significa que las ondas incidente y reflejada tienen la misma amplitud), dicho nodo corresponderá a una región de intensidad cero. Si el espejo no da lugar a un nodo de intensidad cero, reflejará una onda cuya intensidad será menor que la de la onda incidente. Para originar un nodo de intensidad cero la superficie del espejo debe atenuar completamente a la onda incidente dentro de una fracción de longitud de onda. Una atenuación incompleta daría lugar a un nodo de intensidad no nula, lo cual correspondería a que las amplitudes de las ondas incidente y reflejada son distintas o a que la reflectividad del espejo es baja.

Sin embargo, para todos los materiales, la absorción de rayos X blandos es demasiado baja como para alcanzar la atenuación deseada. Ondas que tengan 50 angstroms de longitud, por ejemplo, se desplazaran 500 angstroms por lo menos en cualquier material. A esa longitud de onda y con ángulos de incidencia próximos al perpendicular, los espejos reflejarán sólo una cienmilésima de la radiación incidente.

Un espejo suele presentar sólo una superficie lisa. Nuestras propias investigaciones en el Thomas J. Watson Research Center de IBM Corporation se centraron en la consecución de mejor reflectividad con espejos que tuvieran muchas superficies superpuestas sobre otra. En la figura de interferencia que se produce cuando se superponen dos ondas planas cuya longitud de onda es de 50 angstroms, una incidente y otra reflejada, aparecen un gran número de nodos. Colocando un material absorbente de forma tal que abarque a muchos de los nodos de la figura de interferencia se puede obtener una reflectividad mayor que la que proporciona un espejo constituido por una simple superficie reflectora. Desde hace tiempo se sabe que los cristales naturales reflejan a los rayos X duros si sus átomos coinciden con los correspondientes nodos; en una fecha relativamente reciente se ha señalado la posibilidad de producir materiales artificiales capaces de reflejar rayos X blandos para ángulos de incidencia próximos al de la dirección perpendicular. La fabricación de espejos de rayos X blandos se basa en la producción de materiales artificiales en los que las regiones altamente absorbentes alternan con los débilmente absorbentes, de forma tal que las posiciones de ambas regiones dan lugar a la figura de interferencia deseada. Con este tipo de materiales se esperan alcanzar reflectividades de hasta un 30 por ciento. En colaboración con R.-P. Haelbich y C. Kunz, del Laboratorio alemán del Sincrotrón de Electrones (DESY) de Hamburgo, estamos intentando obtener espejos de capas múltiples para longitudes de onda comprendidas entre los 50 y 200 angstroms. Nuestro objetivo a largo plazo se cifra en construir un microscopio de observación de rayos X que utilice tales espejos con el fin de focalizar dicha radiación.



CORONA SOLAR, emisora de rayos X. La intensidad de esta radiación ha sido codificada cromáticamente en la presente fotografía, tomada por el telescopio de rayos X del Skylab que se reproduce en la figura de la página 39. Los colores varían desde el rojo (emisión débil) al blanco (emisión intensa). Pueden apreciarse la localización de las zonas iridiscentes que emiten la mayor parte de la radiación X observada, así como la presencia de una cierta actividad, menor, en la atmósfera solar. La corona solar corresponde a una región en la que la densidad, la temperatura y la emisión de rayos X es relativamente menor. Esta región está rodeada por campos magnéticos "abiertos" y está relacionada con la existencia de fuertes corrientes de viento solar.

Un espejo ordinario reflejará muy poco aquellos rayos X blandos que incidan sobre él según ángulos próximos a la dirección perpendicular; en cambio, reflejará adecuadamente aquellas ondas que incidan sobre su superficie en forma rasante, es decir, según un ángulo muy pequeño. Para dicha incidencia rasante, los nodos de la figura de interferencia producida por las ondas incidente y reflejada se presentan muy separadas entre sí. Esta circunstancia facilita la colocación de una mayor cantidad de material absorbente en el nodo de la onda estacionaria y, en consecuencia, permite obtener mayores reflectividades para cualquier tipo de material. Por otro lado, para ángulos rasantes muy pequeños la reflectividad aumenta en virtud de otro efecto: la reflexión total. Los espejos de este tipo han servido para focalizar los rayos X blandos en instrumentos tales como el telescopio de rayos X instalado a bordo de los satélites Skylab [*véase la ilustración de la página 39*]. Este telescopio opera bajo un ángulo rasante de 0,916 grados y es capaz de focalizar rayos X blandos con longitudes de onda de más de seis angstroms. Sin embargo, la resolución del telescopio resulta limitada en la práctica por las inevitables imperfecciones de las superficies reflectoras para ángulos del orden de un segundo de arco, un valor mil veces peor que el límite teórico. Este hecho pone de manifiesto una vez más el problema principal con el que deben enfrentarse los sistemas de focalización de alta calidad para rayos X: la fabricación de los correspondientes elementos exige una gran precisión. Los progresos alcanzados recientemente en las oportunas técnicas de producción permiten predecir que durante los próximos años se producirán avances muy sustanciales en este campo de trabajo.

Ciencia y sociedad

Oportunidad perdida

Cuando Ernst B. Chain y Howard W. Florey aislaron la penicilina, en 1939, atribuyeron el origen de su trabajo a la observación que hizo Alexander Fleming de la acción antibacteriana del hongo *Penicillium* en 1928. Sin embargo, el descubrimiento de Fleming, como ha ocurrido con otros muchos descubrimientos científicos, no suponía una novedad absoluta. Es más, quien se había adelantado supo lo que tenía entre manos. En 1896 el estudiante de medicina francés Ernest Augustin Clement Duchesne, de 21 años de edad, demostró nítidamente la acción antibacteriana del *Penicillium*. Los contemporáneos de Duchesne ignoraron su trabajo pionero, y su descubrimiento cayó en el olvido durante 50 años. Robert A. Kyle y Marc A. Shampo, de la Mayo Clinic, lanzan la idea, en una comunicación a *The Journal of the American Medical Association*, de un público homenaje a Duchesne en reconocimiento de tan notable trabajo. Duchesne nació en París el 30 de mayo de 1874. A los 20 años ingresó en la Academia de Medicina Militar de Lyon. Había leído los escritos de Louis Pasteur y estaba dedicado al estudio de los microorganismos. Sabía que si una sola espora del hongo caía en un pedazo húmedo de pan, de fruta podrida, queso o jamón, en pocos días se multiplicaría. Y que en otros lugares en los que era de esperar que los hongos prosperasen, solían hallarse ausentes. Así, aunque las células del hongo eran muy frecuentes en el aire, casi nunca se las veía, con el microscopio, en agua que hubiese sido añadida a cultivos bacterianos. Duchesne se preguntaba si las bacterias mataban a los hongos. Alentado por Gabriel Roux, director del Instituto de Salud Pública, se entregó a su tesis de investigación sobre el tema del antagonismo entre bacteria y hongo. Como sujeto de investigación eligió el hongo *Penicillium glaucum*.

En un principio, Duchesne descubrió que la presencia de la bacteria en un medio en el que estaba creciendo el hongo conducía generalmente a la rápida destrucción de éste. A pesar de lo cual caviló si, en la lucha por la existencia entre hongos y bacterias, no podrían darse ciertas condiciones en las que ganara la partida el hongo. En un experimento cultivó *Penicillium* en un pedazo de alimento húmedo y transfirió bacterias de la especie *Escherichia coli* al hongo. A las pocas horas examinó el hongo y descubrió que la bacteria había sido aniquilada.

En una etapa siguiente inoculó cultivos virulentos de microorganismos patógenos como *E. coli* y bacterias tifoideas en cerdos de guinea. Inyectó luego a la mitad de los animales caldo nutritivo en el que había crecido el *Penicillium*. Al día siguiente los animales a los que se les había puesto la inyección de caldo estaban vivos y sanos, y muertos los no inyectados. Al parecer, el crecimiento de las bacterias en los animales había sido inhibido mediante el extracto crudo del hongo representado por el caldo.

Un año después de iniciadas sus investigaciones, Duchesne las describió en una disertación de 56 páginas titulada "Contribución al estudio de la lucha por la existencia en los microorganismos: antagonismo entre hongos y microbios". Señalaba que, desde sus tiempos de estudiante, apenas si había tenido ocasión de hacer unos pocos experimentos, y que, en cualquier caso, su trabajo debería repetirse y confirmarse. "Una investigación más profunda", añadía, "podría llevar a nuevos avances cuya aplicabilidad directa a la higiene y terapia profilácticas quedaría de manifiesto". En 1897, Duchesne se doctoraba en medicina a los 22 años. Entró en sanidad militar, como había sido su intención; al ser destinado a un regimiento de Senlis, al norte de París, quedó en suspenso su labor investigadora. En 1902 contrajo una enfermedad pulmonar (probablemente tuberculosis), y tuvo que solicitar una excedencia. Volvió al servicio activo al año siguiente y sirvió en el regimiento de Clermont-Ferrand. Pero su enfermedad se agravó y en 1907 se vio obligado a poner fin a su carrera militar. El 30 de agosto de 1912, a los 38 años, murió en Amélie-les-Bains, donde estaba sometiéndose a tratamiento de su enfermedad. Los hallazgos de Duchesne no llamaron la atención hasta que su tesis la descubrió por casualidad un bibliotecario, 50 años después. Como ocurre con muchos otros redescubrimientos, no se sabe por qué los microbiólogos de su tiempo ignoraron su trabajo. No hay pruebas de que Roux, quien le aconsejó sobre el tema de su investigación, ni ningún otro, se preocupara de los resultados de ésta.

Por el tiempo en que Fleming trabajaba en el St. Mary's Hospital School de la Universidad de Londres y observó un círculo bacteriano libre en torno a un hongo verde (*Penicillium notatum*) que había contaminado un cultivo que contenía estafilococos, no había oído hablar todavía de Duchesne ni de su trabajo. Dicha contaminación era un hecho frecuente en el laboratorio bacteriológico, pero Fleming fue el primero en reconocer su efecto antibacteriano. Once años más tarde, Chain y Florey, a la sazón en la Universidad de Oxford, aislaron y purificaron la penicilina. Luego, en 1941, la penicilina se ensayó, con resultados espectaculares, en pacientes que sufrían de varias infecciones bacterianas. La Segunda Guerra Mundial interrumpió las investigaciones sobre la penicilina en Inglaterra, pero los microbiólogos estadounidenses continuaron desarrollando métodos para la producción masiva y estabilización del medicamento.

Fleming, Chain y Florey compartieron, en 1945, el premio Nobel de fisiología y medicina por sus trabajos sobre la penicilina. En septiembre del mismo año, Fleming dictó una conferencia en la Academia de Lyon y mencionó el trabajo de Duchesne, a quien ya conocía por aquel entonces. Dijo que mientras que él había descubierto los efectos antibacterianos del *Penicillium* por casualidad, Duchesne había llegado a ellos por una investigación metódica. Ello no restaba mérito a la crucial contribución de Fleming. Como señaló Francis Darwin, botánico e hijo de Charles Darwin, "en la ciencia, el mérito recae sobre el hombre que convence al mundo, no sobre el hombre al que se le ocurre la idea por primera vez".

Ríos salados de los Andes

En un amplio recodo del río Huallaga en Perú oriental, un explorador geoquímico descubrió un espectacular paisaje. A lo largo de ocho kilómetros de trecho fluvial, y midiendo 100 metros de altura, se destacaba un reluciente acantilado blanco de sal. El río, uno de los afluentes más importantes del Amazonas, está desgastando un enorme depósito de sal de roca. John M. Edmond, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, informa que el acantilado de sal es sólo una muestra de la abundancia de los depósitos salinos en la región del nacimiento del Amazonas, en los Andes de Perú oriental y Ecuador. Edmond, que está trabajando para elaborar un modelo geoquímico del Amazonas, descubrió que los depósitos de sal desempeñan un importante papel a la hora de

determinar la composición química del río.

Las fuerzas de comprensión asociadas con la estructura de los Andes, explica Edmond, originaron los muchos depósitos expuestos de sal de roca en la zona. Bajo presión, la sal de roca se levanta cual si fuera hielo glaciar; y así fue como las tremendas fuerzas de la elevación geológica sacaron la sal de depósitos profundos por grietas y fallas de la roca superficial. De este modo se formaron grandes cúpulas de sal en la superficie. En algunas zonas hay incluso pináculos de sal que alcanzan una altura de varios metros. Edmond descubrió que grandes cantidades de sal de los depósitos se disuelven con el agua de lluvia y son arrastradas al sistema de aguas amazónico. Como consecuencia, muchos de los arroyos y ríos arrastran tal concentración salina que ni hombres ni animales pueden beber sus aguas. Aunque la salinidad de los arroyos y ríos salados afluentes del Amazonas se diluye en la corriente, sigue siendo un importante factor de control en la composición química general del río. Edmond informa que el análisis de muestras de agua recogidas en los Andes peruanos indican que la sal disuelta en los afluentes salados supone por lo menos la mitad del sodio y cloro del Amazonas.

Nobel de economía

Herbert Simon acaba de recibir el premio Nobel de economía para 1978; con ello, la Academia sueca ha querido reconocer la labor, más que de un economista, de quien ha trabajado siempre en un terreno que sirve de base común a todas las ciencias sociales, tal como hoy se las conoce: el estudio del hombre como ser racional y, más precisamente, como *problem-solver*.

Herbert Alexander Simon nació en Milwaukee (Wisconsin) en 1916: se graduó y doctoró en la Universidad de Chicago, y pasó después al Carnegie Institute of Technology (hoy Carnegie-Mellon University) de Pittsburgh, donde ha desarrollado la mayor parte de su carrera científica. Pero Simon es todo lo contrario de un obscuro profesor de universidad: es también miembro de la American Academy of Arts and Sciences, de la Cowles Foundation, de la Econometric Society, de la American Psichological Association y de la American Philosophical Association; y formó parte del Science Advisory Council del Presidente de los Estados Unidos de 1968 a 1971, últimos años de esplendor del célebre consejo. Hay, pues, en su carrera éxitos suficientes para colmar a un economista, a un psicólogo, a un filósofo y, posiblemente, también a un político. El premio Nobel parece haber sido la última recompensa debida a una labor de una importancia poco común.

Sin embargo, la decisión de la Academia es, a primera vista, sorprendente, no porque las aportaciones de Simon a la economía sean escasas o insignificantes en sí mismas, sino porque lo parecen cuando se las considera en el conjunto de su obra escrita. Se trata, sin duda, de una figura mucho más conocida en disciplinas afines a la economía –para las que, sin embargo, no hay premio Nobel– que entre los propios economistas, que le recuerdan, sobre todo, por su artículo con Davis Hawkins (*Econometrica*, 1949) donde se desarrollan las condiciones de estabilidad que hoy se llaman de Hawkins-Simon, por su trabajo "Theories of Decision-Making in Economics" (*American Economic Review*, 1959) y por su participación con Holt, Modigliani y Muth en *Planning of Production, Inventories and Work Force* (1960) y con Fisher y Ando en *The Structure of Social Science Models* (1968). Otros trabajos, si bien numerosos, son menos importantes.

Su producción menos directamente relacionada con la economía es, por otra parte, más abundante. Citemos, por limitarnos a los libros más conocidos: *Administrative Behavior* (1947), *Public Administration* (1950), *Models of Man* (1956), una de sus obras más conocidas, *The Sciences of the Artificial* (1969) y, con A. Newell, *Human Problem Solving* (1972).

Para situar la obra de Simon en relación con la economía hay que tener presente que ésta, aunque persigue objetivos formalmente idénticos a los de cualquier otra disciplina científica, es decir, la explicación y predicción de un campo de fenómenos observables delimitado de forma más o menos accidental, se diferencia de las ciencias de la naturaleza en que su objeto de estudio es, a fin de cuentas, el comportamiento humano: es decir, el de un agente racional, que trata conscientemente de sacar el mejor partido posible de cada situación, consiguiéndolo unas veces y otras no; que se comporta de forma distinta frente a estímulos objetivamente idénticos, o en situaciones aparentemente idénticas, ya sea porque cambia su percepción de las mismas, ya sea porque comete errores al tratar de seleccionar el mejor comportamiento posible.

Por consiguiente, es lógico que en economía, y en otras ciencias del comportamiento, el principio de optimización, que en física tiene a lo sumo una utilidad heurística o expositiva, sea una hipótesis de partida fundamental; y de ahí el desarrollo de dos campos de investigación que no tienen paralelo en otras ciencias: la psicología de la percepción y la teoría de la decisión, en la aceptación más amplia del término. Simon –cuya única contribución importante a la economía "positiva" es el trabajo con Hawkins– empieza en el segundo de estos campos para, alejándose progresivamente del ámbito de la economía, irse adentrando en un terreno a medio camino entre la teoría de la decisión y la psicología del comportamiento: el estudio de la inteligencia artificial.

Así, en la primera parte de su obra, a la que pertenecen, con una importancia secundaria, la mayor parte de sus contribuciones a la teoría económica, Simon trata de formular reglas o algoaritmos que permitan seleccionar la mejor decisión posible frente a un problema más o menos general, a la vez que se interesa por describir el comportamiento de organizaciones complejas. Está, pues, entre la investigación operativa y la sociología de la organización. Pero con *Models of Man* da un paso decisivo: se centra en el concepto del individuo como "mecanismo que procesa información", y trata de simular el comportamiento humano partiendo de esta idea básica. El hombre es únicamente una entidad que resuelve problemas, que optimiza. Así describe él mismo su hipótesis de partida: "Una hormiga, considerada como un sistema de comportamiento, es algo muy sencillo. La complejidad aparente de su comportamiento a lo largo del tiempo es, en gran parte, un reflejo de la complejidad del medio ambiente en que se halla (...) personalmente, creo que la hipótesis es válida incluso para el hombre en su totalidad." (*The Sciences of the Artificial*, pp. 24-25).

Esta preocupación da razón de su última obra, *Human Problem Solving*, cuyo contenido está en la línea cultivada, entre otros, por Polanyi, pero con un punto de partida mucho más radical: para Simon, lo único que vale la pena conocer del hombre es su aspecto de *problem-solver*. A esta autolimitación inicial responde su interés por el desarrollo de la inteligencia artificial; si el hombre es, sobre todo, un centro de procesos de datos que opera con ciertas reglas, incluso en aquellas actividades aparentemente menos mecánicas, o menos previsibles, entonces debe ser posible simular su comportamiento –todo su comportamiento– por medio de máquinas lógicas.

Sobre esta base edifica Simon su *General Problem Solver*: una teoría que "propone un sistema que, suponiendo que se le conceda tiempo suficiente, puede reaccionar ante cualquier detalle de –por ejemplo– una enciclopedia, o una biblioteca de ellas." (*Human Problem Solving*, p. 864). De la confianza de Simon en las posibili-

dades de esta teoría dan idea estas palabras suyas, escritas en 1960: "En un futuro muy próximo –mucho antes de que pasen veinticinco años– tendremos la capacidad técnica suficiente para sustituir (hombres por) máquinas en todas y cada una de las funciones humanas en (una) organización."

El vaticinio de Simon no lleva camino de cumplirse a tiempo, pero podría no tratarse más que de un error de cálculo. Lo cierto es que esta vertiente de la obra de Simon que subyace a toda su labor aparentemente más técnica es la que hace de él, mucho más que un científico brillante, una figura excepcional: su dedicación absoluta a llevar una hipótesis inicial –desgraciadamente, sin tratar de verificarla– hasta sus últimas consecuencias. Como sucede con B. F. Skinner, con el que Simon acaba teniendo muchos puntos en común, la negativa a todo compromiso con su base de partida tiene mucho de admirable, pero también algo de obcecado; en el fondo, en Simon parece superponerse una enorme arrogancia intelectual –la creencia de que todo es comprensible, no por la razón, sino por la parte menos creadora de ésta, cuyo modelo es el razonamiento deductivo– con una humildad estremecedora en su concepto del individuo y de la especie humana: "Sólo el orgullo de la especie nos hace sostener que lo aparentemente intrincado de nuestra trayectoria proviene de una fuente completamente distinta de la que inspira el camino de la hormiga."

No es de extrañar, pues, que la posición filosófica de Simon haya sido objeto de las mismas críticas que la de otros *behavioristas*. Uno de sus críticos más ilustres, y quizás a la vez el más enérgico, Joseph Weizenbaum, resume sucintamente la posición de los behavioristas frente a la obra de Simon: "Nada tiene de malo considerar al hombre como un centro que procesa información (...) o como otra cosa cualquiera, siempre que no hagamos nunca como si una única perspectiva fuera capaz de abarcar al hombre entero." (*Computer Power and Human Reason*, p. 175) (A.P.)

Nobel de física

El Nobel de física se ha concedido a Pyotr Leonovitch Kapitsa, Arno A. Penzias y Robert W. Wilson. Pyotr Leonovitch Kapitsa ha sido galardonado "por sus fundamentales hallazgos en el campo de la física de bajas temperaturas". Kapitsa tiene ahora 84 años de edad y dirigió durante muchos años el Instituto de Problemas Físicos de la Academia de Ciencias de la Unión Soviética. En 1934 construyó la primera máquina capaz de producir helio líquido en grandes cantidades. Pocos años más tarde demostró que una forma del helio líquido, el helio II, exhibía una viscosidad casi nula y por tanto actuaba como un "superfluido". Los experimentos de Kapitsa indicaban que el helio II se hallaba en un estado cuántico macroscópico, con un orden atómico perfecto. "Los descubrimientos, ideas y nuevas técnicas de Kapitsa", según la notificación oficial, "han sido fundamentales para el desarrollo de la ciencia de la física a bajas temperaturas".

Arno A. Penzias y Robert W. Wilson, de los laboratorios Bell, comparten con Kapitsa el premio Nobel de física "por el descubrimiento de la radiación cósmica de fondo de microondas". A finales de la década de 1940, George Gamow propuso que si el universo hubiese sido creado en una gran explosión, la "bola de fuego" resultante aún no se habría enfriado hasta el cero absoluto. En 1948, él y sus colaboradores Ralph A. Alpher y Robert Herman predijeron que la radiación emitida por la gran explosión llenaría el universo actual con una radiación de fondo de microondas cuyo espectro correspondería al de la radiación emitida por un cuerpo negro a una temperatura de cinco grados Kelvin (grados Celsius por encima del cero absoluto).

En 1964, Penzias y Wilson, que no conocían esta predicción, emprendieron la tarea de medir 'a radioemisión de fondo de la galaxia, mediante un detector extremadamente sensible de 609,60 centímetros que había sido diseñado para recibir señales emitidas por el satélite Echo. Con gran sorpresa por su parte, Penzias y Wilson detectaron una cantidad sustancial de ruido de microondas a una longitud de onda de 7,35 centímetros (4080 megaciclos por segundo), que correspondía a la radiación de un cuerpo negro con una temperatura de tres grados Kelvin. Al nivel de sensibilidad de sus mediciones, la emisión era independiente de la dirección en el espacio. Venía de fuera de nuestra galaxia y, por supuesto, del universo en su totalidad. La implicación de tal descubrimiento quedó aclarada cuando tuvieron noticia de éste Robert H. Dicke y sus colegas, de la Universidad de Princeton, que a la sazón estaban buscando el resto de la radiación de la gran explosión con su propio detector.

El descubrimiento apareció en sendas cartas dirigidas a *The Astrophysical Journal*; firmaban una de ellas Penzias y Wilson, y allí describían "una medición de temperatura de antena excesiva a 4080 megaciclos por segundo"; la otra remitida por Dicke, P.G. Roll, David T. Wilkinson y P. James E. Peebles, aportaba una explicación al exceso por vía cosmológica o de la gran explosión. La isotropía más o menos imperfecta de la radiación cósmica de fondo se ha utilizado recientemente para establecer el movimiento absoluto de la tierra, y por tanto de nuestra galaxia, en el espacio (véase "La radiación cósmica de fondo y el nuevo movimiento del éter", por Richard A. Muller; INVESTIGACION Y CIENCIA, julio, 1978).

Nobel de química

El Nobel de química se ha otorgado a Peter Mitchell, de los Glynn Research Laboratories de Cornoualles, "por su contribución a la comprensión de la transferencia de la energía biológica a través de la formulación de la teoría quimiosmótica". Era el primer premio Nobel, que se recuerde en los últimos años, concedido a un investigador que no estuviese afiliado a una institución de renombre. Mitchell trabajaba anteriormente en la Universidad de Edimburgo, y ahora ha instalado su laboratorio privado en una gran casa señorial que compró y restauró a principios de los años 60. Allí trabaja con su principal colega, Jennifer M. Moyle, y con investigadores visitantes. El principal interés de Mitchell ha sido el mecanismo por el que la célula viva obtiene, tranforma y utiliza la energía que necesita para sus múltiples actividades. La principal molécula portadora de energía es el adenosín trifosfato (ATP). Un problema clave es el mecanismo por el que un grupo fosfato inorgánico se enlaza con adenosín difosfato (ADP) en el proceso de la fosforilación oxidativa. Antes del hallazgo de Mitchell la hipótesis comúnmente aceptada postulaba que el enlace se hacía directamente por acción enzimática.

A pesar de las investigación intensiva en muchos laboratorios, estas hipótesis no encontraron apoyo. En 1961 Mitchell propuso una idea radicalmente diferente. Sugirió que un flujo de electrones a través de un sistema de moléculas portadoras acarrea iones de hidrógeno (protones) a través de la membrana exterior de las células bacterianas, o de las membranas similares que encierran orgánulos subcelulares tales como las mitocondrias o los cloroplastos. Como consecuencia, a través de la membrana se crea un gradiente electroquímico. El gradiente consta de dos componentes: una diferencia en el *p*H, o concentración de hidrogeniones, y una diferencia en el potencial eléctrico. Juntos proporcionan lo que Mitchell llama una fuerza "motora de protones", capaz de llevar a cabo la síntesis del ATP. Vista con escepticismo durante mucho tiempo, la teoría quimiosmótica de Mitchell pertenece ya al legado de la ciencia (véase "Cómo fabrican ATP las células", por Peter C. Hinkle y Richard McCarty. INVESTIGACION Y CIENCIA, mayo, 1978).

Mosaicos romanos de Mérida

La dificultad de arrancar un mosaico sin destruirlo y el valor nulo de sus materiales cuando éstos se desgranan han favorecido la conservación de numerosos mosaicos

Antonio Blanco Freijeiro

La ciudad romana de *Augusta Emerita* fue fundada por el emperador Augusto, a través de su legado Publio Carisio, tras la toma de Lancia (provincia de León), durante la guerra contra los cántabros y astures. La data fundacional cae en el año 25 a.C. Sus primeros pobladores eran soldados licenciados (*emeriti*), de las legiones *V Alaudae* y *X Gemina*, a quienes se otorgaron solares para sus casas y terrenos para sus cultivos en muchas millas a la redonda. El largo puente que vadea el Guadiana, cuya traza romana se conserva íntegra entre la Alcazaba y el islote central del río, se remonta a la época fundacional. Igualmente lo hacen el pequeño y armonioso puente sobre el arroyo Albarregas, camino de Cáceres, y los restos del acueducto de Cornalvo, el *Aqua Augusta*, como lo llama una inscripción. En sus monedas, la colonia hace alarde de la grandiosa puerta que aún campea en el escudo de la Mérida actual, y de algunos de sus monumentos: el altar de la *Providentia* y el templo de la *Aeternitas*, calificadas ambas de *Augustae*, a los que seguiría muy pronto, entre los edificios del foro, un templo hexástilo conservado en parte, el "Templo de Diana", según la tradición popular.

Para hacer a la ciudad más atrayente, se iniciaron también, a raíz de su fundación, las construcciones del teatro, dedicado por Agripa en los años 16-15 a.C., y del anfiteatro, inaugurado en los años 8-7 a.C., como acreditan las respectivas inscripciones. El tercero de los grandes recintos de espectáculos, el circo, carece de documentos de su primera construcción, pero debe ser también muy antiguo, porque cuando fue restaurado en las postrimerías del reinado de Constantino el Grande (306-337) estaba cayéndose de viejo (*vetustate conlapsus*), como señala su lápida conmemorativa.

Con sus ciudadanos adscritos a la tribu Papiria, Mérida adquiere a poco de su fundación el privilegiado rango de capital de la Lusitania, sede de la administración y centro de la religiosidad oficial de la tercera de las provincias hispánicas instituidas por Augusto. Ya entonces su aspecto urbano debía de ser digno de una metrópoli de la latinidad en un territorio que Roma se proponía asimilar. Y así, en efecto, el arte de época augústea en Mérida hace gala de su estirpe romana frente a otras manifestaciones locales de la misma provincia.

Salvo los monumentos arquitectónicos antes apuntados, los vestigios de la primitiva ciudad de Mérida yacen ocultos bajo el caserío actual. La red de su alcantarillado ha podido ser seguida con puntualidad, confirmando lo que en buena lógica cabía esperar: que, como ciudad romana de nueva planta, Augusta Emerita había sido trazada de una vez según un sistema ortogonal de calles tiradas a cordel, paralelas y perpendiculares unas a otras. El llamado "Arco de Trajano" enfilaba uno de sus ejes principales, el *Cardo Maximus*; por otra parte, la actual Calle de Santa Eulalia, que prolonga la línea del puente del Guadiana, conserva el trazado de la otra arteria principal, el *Decumanus*. Aun con las variantes que la red viaria ha experimentado en el curso de los siglos, el callejero de la Mérida de hoy refleja en sus líneas generales la tónica de regularidad que los romanos le imprimieron.

Las parcelas de la primitiva urbanización fueron sin duda distribuidas entre los colonos, pero ni de aquella época, ni de todo el siglo I conocemos casa alguna. Los ejemplos conservados, todos ellos del siglo II y posteriores, pertenecen al tipo de casa señorial, de patios y peristilos, mejor dispuesta para resistir el calor que el frío, y por lo mismo conservada en estas latitudes hasta tiempos recientes, en que la especulación del suelo ha hecho prohibitivas las viviendas de este género.

La costumbre de pavimentar las mejores habitaciones de la casa con mosaicos de teselas la habían implantado los griegos en el período helenístico y de ellos la adoptaron los romanos, sus difusores por las provincias occidentales del imperio. Su elaboración era delicada y lenta, aunque cooperasen en la misma varios artistas. Para que los diminutos cubos (teselas, en lenguaje técnico) quedasen firmemente ajustados y sujetos, era menester preparar el lecho con sumo cuidado, pues de esa preparación iba a depender en gran medida la duración de la obra. Con tales miras, los romanos empezaban por extender sobre el terreno, bien allanado y apisonado, una primera capa de cimentación (*rudus*), de 3 a 4 cm de espesor, compuesta de mortero de cal, guijarros y arena. La segunda capa (*nucleus*), de unos 3 cm de grueso, solía hacerse de cal y arena (en proporción de 2:1), con mezcla de fragmentos y polvo de teja. Finalmente, preparaban el lecho propiamente dicho con una capa de 1 a 2 mm de espesor, compuesta de mortero de cal y polvo de mármol, de gran poder adhesivo. En esta última iban incrustadas las teselas.

Pese a todas las precauciones, los pavimentos sufrían deterioro. Es curioso observar cómo en los Baños de la Reina Mora, en Itálica, los constructores de las termas, percatados del desgaste que experimentaban los mosaicos en salas frecuentadas por mucho público, no emplearon teselas cúbicas, sino prismáticas rectangulares, de manera que en las excavaciones se ha podido constatar cómo en las áreas marginales las teselas conservaban su forma original, mientras en el resto habían quedado convertidas en cubos a fuerza de ser pisadas.

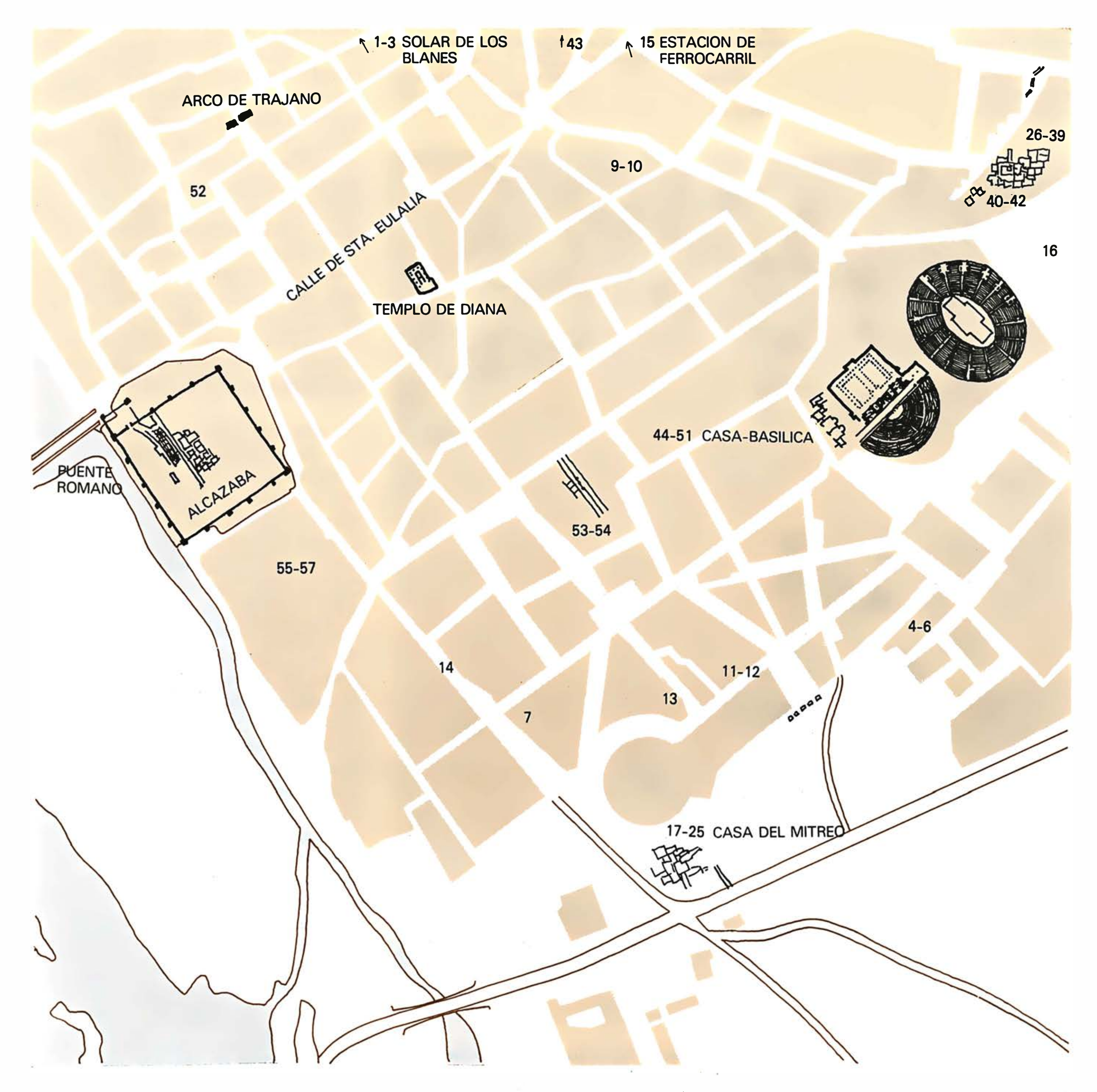
No es raro que en una misma habitación se encuentren dos y hasta tres mosaicos superpuestos. El fenómeno puede obedecer a un cambio de gusto –pues también en el mosaico hubo sus modas– o a que el pavimento se había estropeado tanto que no merecía la pena restaurarlo. En la llamada "Casa-Basílica" de Mérida podemos contemplar cómo una serie de mosaicos del siglo IV d.C. se superpone a otra del siglo II, esta última muy estropeada y ya torpemente restaurada antes de que los dueños de la casa decidiesen ponerle una nueva solería. En casos como éste se ahorraba la cimentación, pues el

nuevo mosaico tomaba asiento sobre los restos de su predecesor.

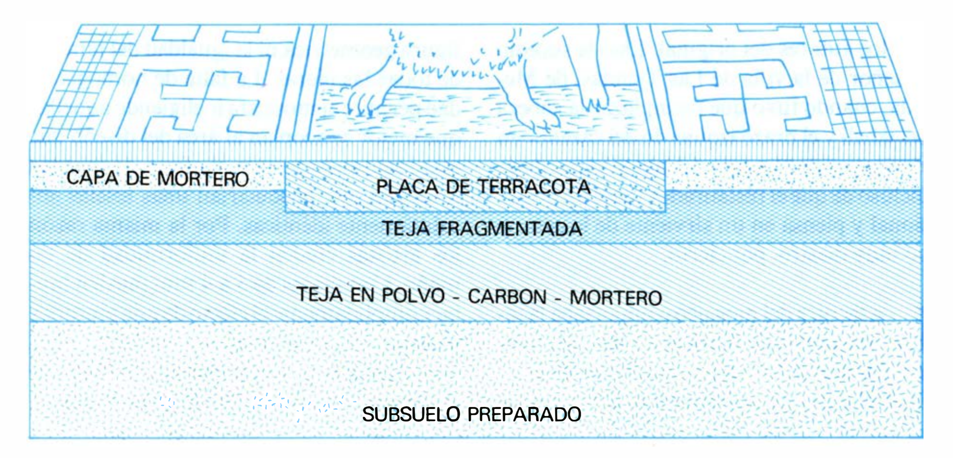
Al borde de un hermoso ejemplar de Torre de Palma (Portugal) una inscripción parece advertir: "No estropees el mosaico echándole agua a cubos; disfruta de él" *(sc[ate] bra tesselam ledere noli; uteri f(elix)*, y es evidente que la admonición fue respetada, pues el mosaico ha llegado a nosotros admirablemente conservado.

Cuando el mosaico lo merecía, sus propietarios procuraban restaurarlo, aunque no encontrasen artistas dignos de codearse con los autores del original. Esto le sucedió al señor de la villa de Las Tiendas, de Mérida, cuando tuvo que reemplazar la cabeza del jabalí y el brazo izquierdo del cazador en el mosaico de "La caza del jabalí". Uno duda incluso de que el restaurador fuese un profesional y piensa en un sirviente de la casa, y no muy diestro, por cierto.

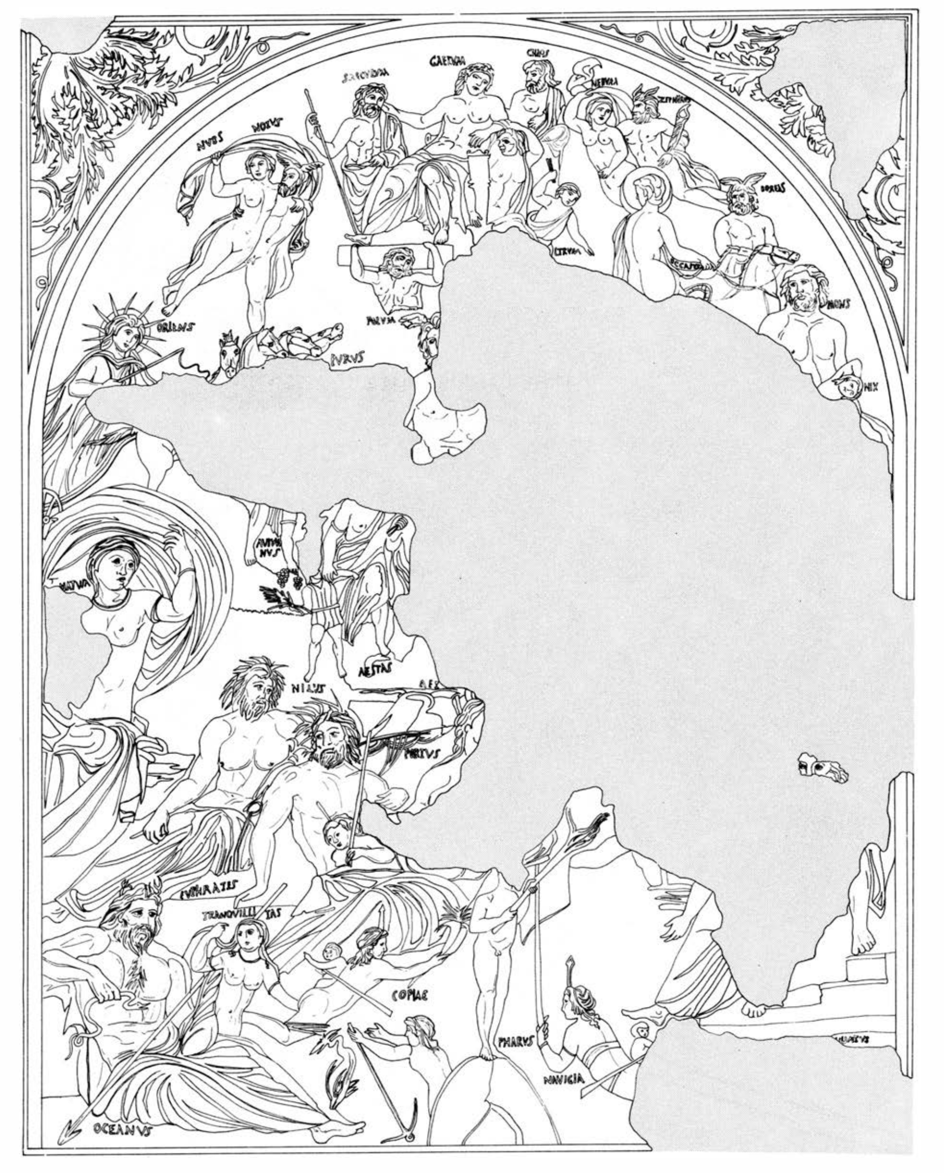
La factura del mosaico comportaba la tarea previa de fabricar a mano las teselas. Aunque la forma predominante de éstas fuese el cubo, no se buscaba ni el rigor de la figura geométrica ni la igualdad del tamaño de todas las piezas. La falta de homogeneidad permite al mosaísta ir eligiendo aquellas que mejor se acoplan al área del diseño que está realizando y evita el efecto de frialdad mecánica que producirían unas teselas absolutamente idénticas. Por la misma razón los artistas eluden la uniformidad de tamaño. Con piezas de 3 a 4 mm pueden imitar cumplidamente el efecto de una pintura y trabajar con otras mayores en los fondos, orlas, cenefas y, por supuesto, también en las composiciones de dibujo geométrico.



PLANO DE MERIDA. Junto a los monumentos que subsisten —el teatro, el anfiteatro y otros señalados en el plano— el trazado ortogonal de una ciudad romana de nueva planta, fundada por Augusto en el año 25 a.C., se mantiene en la orientación y rectitud de las calles actuales. La dominación árabe, de poca importancia en Mérida, sólo dejó como vestigio el recinto de la Alcazaba, construido sobre ruinas romanas y visigodas. Los números corresponden a los mosaicos descubiertos.



ESTRATIGRAFIA DE UN MOSAICO de Pompeya mostrando la sucesión de capas y materiales que forman su lecho. En este caso, y como era frecuente en mosaicos helenísticos, la parte más importante del mismo, el emblema, elaborado con teselas finísimas (que pueden llegar a medir un milímetro de lado) era portátil y se incrustaba en el pavimento sobre la misma placa de sustentación con que salía del taller. Con sus teselas tan diminutas el mosaísta podía copiar un cuadro imitando incluso la huella de las pinceladas. Este tipo está relativamente bien representado en Ampurias, donde la tradición griega se conservó y no fue suplantada por las modas imperiales



MOSAICO COSMICO, el más importante de los hallados en Mérida. Representa el mundo físico mediante la personificación de los elementos del cielo, de la tierra y del mar, cada uno de ellos acompañado de su nombre correspondiente. El cuadro mide 8,09 por 5,92 metros y fue realizado en la segunda mitad del siglo II d.C. Artesanos de gran clase, venidos de Oriente y de Africa, donde se hacían estas composiciones monumentales polícromas, compusieron con caros materiales (mármol "negro italiano" y laminillas de oro) todas estas figuras.

Los materiales empleados en la generalidad de los mosaicos emeritenses son la caliza blanca y la negra azulada; la roja "de Alicante"; el mármol violáceo de Alconera; el amarillo de caliza y de canto de río, todos ellos asequibles en la comarca y algunos incluso en el cauce y en las orillas del Guadiana. Otros colores, como el carmín, el naranja, el azul, el verde y el amarillo fuerte, se obtenían con teselas de vidrio. En ocasiones, y sobre todo en mosaicos tardíos, aparecen teselas rojas y amarillentas de cerámica.

Es probable que para mosaicos especialmente suntuosos, como el Cósmico de la Casa del Mitreo, se recurriese también a materiales importados, si no es que todo el mosaico era producto de importación. Por ejemplo, el negro empleado en este ejemplar pertenece al género calificado de "italiano", de una intensidad y una pureza mucho mayores que las del negro-azulado, usado comúnmente. En este mismo mosaico, y en algún otro, ciertas partes, como el nimbo radiado de Oriens y las joyas que lucen otras figuras, estaban realizadas con teselas de vidrio transparente que encerraban una laminilla de oro. Cuando la casa quedó abandonada, estas teselas áureas fueron arrancadas, pero no sin que algunas pasasen inadvertidas a los ladrones. Gracias a esto el restaurador moderno ha podido suplir, con oro de imitación, las pérdidas del original.

Sobre cómo eran ejecutados los mosaicos reina diversidad de pareceres. Los emblemas de tipo helenístico, exportables, iban montados en una placa de terracota, mármol o pizarra, que se incrustaba en el conjunto teselado de un pavimento mayor, como se aprecia en la sección de un piso de la Casa del Fauno, de Pompeya. Para confeccionar un mosaico de este género apreciadísimo bastaba con dibujar en la placa la plantilla de la composición y adherir sobre la misma las teselas correspondientes. Pero los cuadros grandes, carentes de placa de sustentación, requerían un procedimiento similar al de los talleres modernos y al empleado en el levantamiento y traslado de mosaicos antiguos por los especialistas en este delicado menester. Si admitimos la necesidad de que en mosaicos como los aquí ilustrados trabajasen al mismo tiempo varios operarios, so pena de que la obra durase varios años, cabría suponer que el modelo fuese trasladado en sus líneas principales a un material fuerte pero liviano, como la tela o el papiro, fácil de recortar en trozos, que eran distribuidos entre los diversos operarios. Estos, siguiendo un modelo polícromo, se aplicarían a fijar sobre sus respectivos fragmentos las teselas en negativo, es decir, invertidas. Tal vez la obra del taller no pasara de ahí y la reunión de las diversas partes no se verificase hasta el momento de

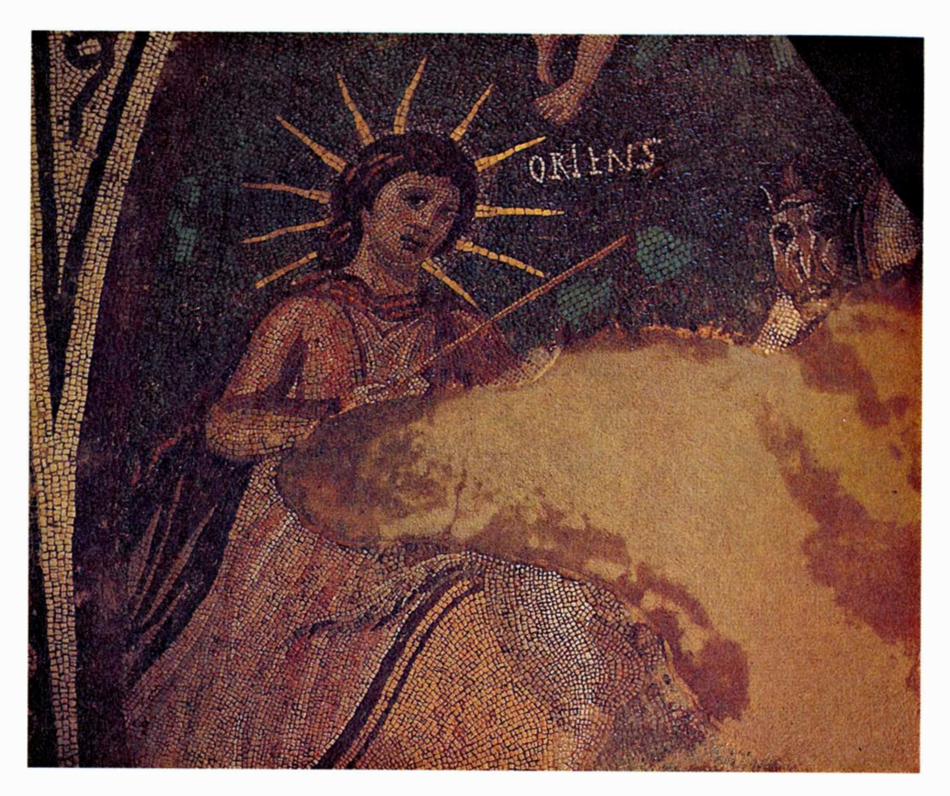
su llegada e instalación en el lugar de destino.

Los letreros de algunos mosaicos nos dan a conocer los nombres de sus autores respectivos o de los maestros responsables. Y es curioso constatar que en su mayoría son nombres de griegos o de semitas residentes en Mérida. Uno de estos últimos, *Baritto*, hace constar su condición de esclavo de la ciudad –*coloniae (servus)*–; otros dos, *Seleucus* y *Anthus*, griegos, se limitan a señalar que hicieron el trabajo en, o para, la *Colonia Augusta Emerita*. Del mismo origen debía ser un cierto *Partenus*. En rigor, el único nombre de aspecto latino, y aún no muy fiable, es el de un propietario de taller, Annius Ponius (?), que en una de sus obras hace constar: *ex officina Anniponi*.

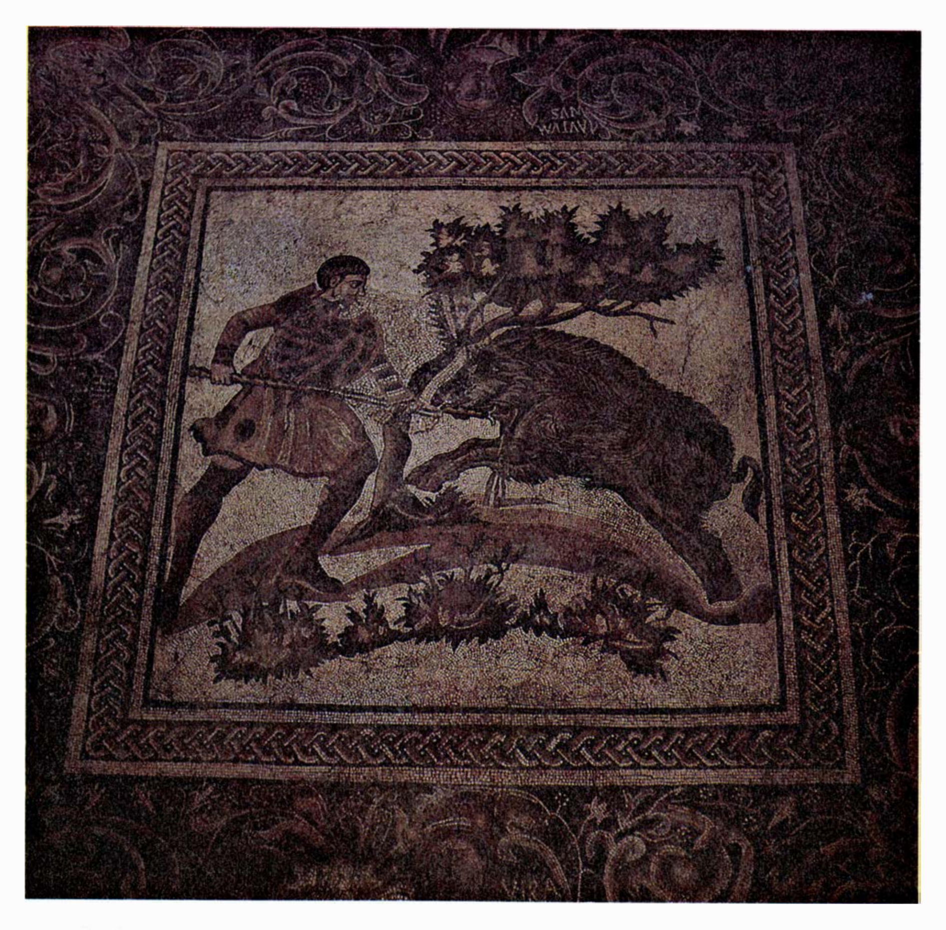
Es muy de lamentar que en el caso del Mosaico Cósmico, el más notable de todos los de Mérida y probablemente también de España, no sepamos el nombre del artista y ni siquiera el del propietario de la finca. A esta última se la conoce como "Casa del Mitreo" en razón de su proximidad a los restos de un santuario de Mitra descubierto a principios de siglo en el solar de la Plaza de Toros, pero sin que haya otro motivo que justifique tal denominación. La casa fue construida, pavimentada y decorada con pinturas murales en la primera mitad del siglo II d.C., y en un momento algo más avanzado, una de sus habitaciones acogió a este magnífico mosaico.

Ya antes nos hemos referido a él ponderando la riqueza de sus materiales. Parece increíble que una obra tan primorosa, realzada por sus teselas de oro y de mármoles costosísimos, no se destinase a una pared, sino a un pavimento. La literatura latina conserva el recuerdo de extravagancias semejantes en muebles y objetos de adorno que por sí solos valían una fortuna. Y aquí tenemos un ejemplo. En cierta manera hemos de felicitarnos de la ocurrencia del propietario, pues si éste hubiera dispuesto que el mosaico fuese instalado en un muro y no en un pavimento, es seguro que hubiese sucumbido, o que por lo menos no hubiese llegado a nosotros conservado en dos tercios de su extensión original.

El conjunto constituye lo que el poeta bizantino Juan de Gaza, al describir una obra semejante, llamaba un *kosmikós pínax*, esto es, una representación del mundo físico mediante la personificación de sus elementos. Cada uno de éstos se halla acompañado de un rótulo que permite identificarlo con seguridad. La composición, algo parecida a la de "La Gloria" de Tintoretto, del Museo del Prado, está presidida por una trinidad en la que un Cielo de aspecto juvenil (*Caelum*) se halla flanqueado por dos ancianos, el Caos (*Chaos*) y el Tiempo (*Saeculum*). A sus pies



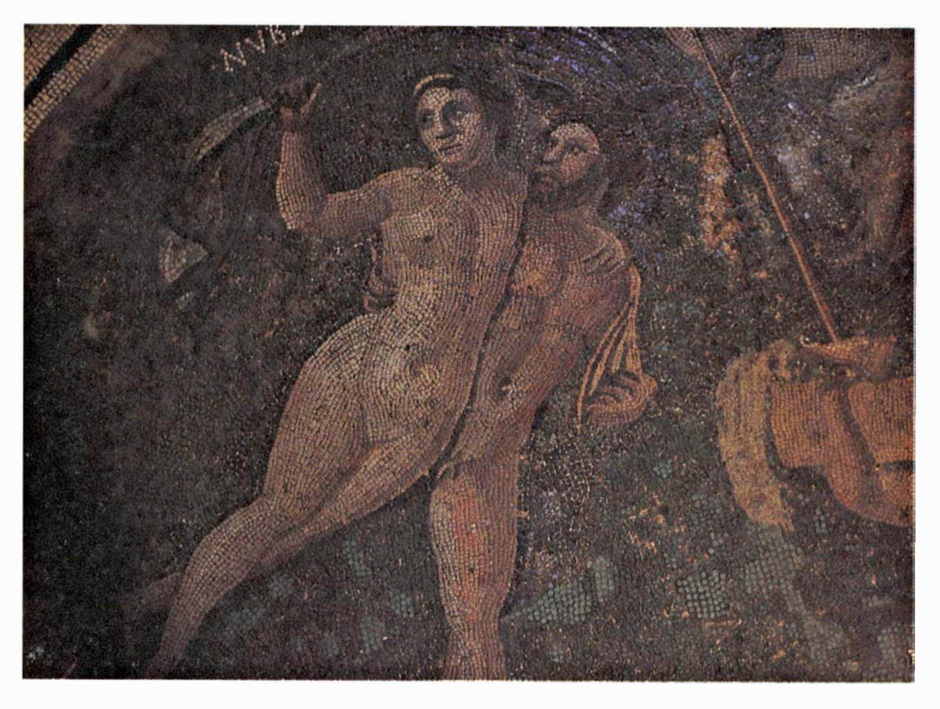
ORIENS del Mosaico Cósmico. El sol naciente inicia su travesía del cielo en un carro tirado por una cuadriga de caballos blancos. El nimbo radiado que rodea su cabeza estaba hecho con teselas de oro, casi todas robadas al quedar abandonada la casa y restauradas ahora con oro de imitación. El culto al Sol Invictus alcanzó enorme importancia durante la época imperial y levantó templos como el construido por Aureliano en Roma.



ESCENA DE CAZA, de la villa de Las Tiendas, cerca de Mérida. El centro del hermoso mosaico hubo de ser restaurado en la Antigüedad, pero por un artesano inexperto que no acertó a reconstruir bien la cabeza del jabalí y parte de la figura del cazador. En España había tal afición a la caza, que Adriano, mucho antes de ser emperador, se contagió de ella hasta el punto de ser objeto de censuras y de que Trajano se lo llevase de Itálica consigo.



EROS O CUPIDO, de la Casa del Mitreo. Pese a encontrarse en la misma casa del Mosaico Cósmico, este pseudoemblema no parece salido del mismo taller. El gracioso Cupido sujeta entre sus manos, amorosamente, una paloma. El genio del amor era travieso como todos los niños. Tal vez la expresión contrita con que lo vemos aquí se deba a que está escuchando una reprimenda de su madre Venus por haber hecho alguna de las suyas. La paloma está hecha casi toda de teselas de vidrio. La pieza es importante y por eso no está fijada a su pavimento. Cada noche ha de ser recogida y puesta a recaudo de los ladrones, verdadera plaga para los conjuntos monumentales.



NUBS Y NOTUS, detalle del Mosaico Cósmico. El viento sur transportando a la personificación de las nubes. Las alas que el viento lleva en las sienes no son órganos de vuelo, sino símbolos de velocidad. En el mosaico estaban representados los otros tres vientos principales, pero del Euro sólo se conserva el nombre y el extremo de una pierna. La Nube está figurada según el patrón helenístico que concebía a las corrientes del aire como ninfas nubladas de vaporosos cendadales: *aurae velificantes*, de la poesía latina. *Notus* era un viento bonancible.

un grupo de titanes, entre ellos el Polo (*Polum*) y el Rayo (*Tonitrum*), sostienen y escoltan a los señores del cosmos. El Sol naciente (*Oriens*) se remonta en el firmamento mientras la Luna (*Occasus*) declina por el otro extremo del mismo. Los cuatro Vientos principales (*Boreas, Eurus, Zephyrus* y *Notus*), uno de ellos portador de una Nube (*Nubs*) y otro de la Niebla (*Nebula*), corren a través del espacio.

El tercio central, afectado por las mayores pérdidas, correspondía a la Tierra. Aquí se conserva la personificación de un Monte (*Mons*), que tiene dormida en su regazo a la Nieve (*Nix*). En medio, con alas en las sienes, parece haber estado Aión, el Tiempo Eterno –*Aet(ernitas)*, decía el rótulo a sus pies– acompañado de las Estaciones del año –*Aestas* y *Autumnus* conservan sus nombres–. Junto a ellas, hermosa como una Venus, se encuentra *Natura*, la Naturaleza física. No sabemos exactamente qué otras figuras faltan, pero en un mosaico análogo de Siria aparecen la Agricultura, Triptolemo como inventor del arado y Prometeo modelando al primer hombre en presencia de Psique y de otras figuras.

Por último, el mundo acuático. Los grandes ríos del mundo civilizado (*Nilus, Euphrates* y tal vez el Orontes y algún otro) acompañan a la personificación de una ciudad portuaria (*Portus*) precedida de una faro (*Pharus*). Junto al Océano (*Oceanus*) y al Mar (*Pontus*) flotan en sus aguas las personificaciones de las Naves (*Navigia*), del viento favorable a las mismas (*Tranquillitas*) y de los frutos de la tierra (*Copiae*) que el comercio marítimo y fluvial hace llegar a todas partes. En el cuadro reinan la paz y la armonía, como si el mundo unificado y gobernado por Roma hubiese recuperado la felicidad de la Edad de Oro.

Entre los setenta mosaicos que hasta ahora conocemos en Mérida no existe ningún otro que pueda ser atribuido al mismo taller. Aun los restantes pavimentos de la casa siguen distintos derroteros. La mayoría de ellos obedece a la moda italiana del mosaico blanco y negro, que predomina en el siglo II. Por tanto, cabe pensar que este raro espécimen fuese importado de Oriente o de Africa del Norte, donde la tradición helenística del mosaico polícromo nunca se vio interrumpida, o en la estancia temporal en Mérida de un grupo de artistas de aquella procedencia.

La afición a las carreras de carros se mantuvo durante toda la duración del imperio romano. Y en Hispania se criaban magníficos corceles. Aún en una fecha tan avanzada como la del año 400 el ganadero español Euphrasius recibe de su amigo Symmachus, senador de Roma, una petición de caballos para las carreras con que



CUADRIGA VENCEDORA, festejada en un mosaico del siglo IV. Una inscripción exhorta al auriga: "Ala Marcianus!"; las otras dan el nombre del caballo principal, Inluminator, y del propietario de la cuadra, Getulus, un germano.



UN VIENTO perteneciente al conjunto del mosaico de los aurigas. En este caso el personaje es un joven con clámide, sin alas en las sienes, de cuya boca emanan las corrientes del aire. La concha que se halla detrás es un motivo normal de relleno.

éste proyecta festejar la pretura de su hijo. Ya hemos dicho que el circo o hipódromo de Mérida fue restaurado a finales del reinado de Constantino. En aquella época el propietario de una casa situada en la actual calle Masona puso en un salón de la misma un gran mosaico, con un centro de asunto báquico que ha llegado a nosotros muy estropeado, entre dos cuadros dedicados a sus aurigas predilectos, *Paulus* y *Marcianus*. Sus nombres van acompañados de una exclamación, *nika* en el primer caso y *nicha* en el segundo, traducible por el "¡ala!" con que los aficionados alientan hoy a sus deportistas favoritos. En el cuadro dedicado a Marcianus figura además el nombre de un caballo, *Inluminator*, algo así como "Lucero", y el del criador, *Getulus*, tal vez el propietario de la casa. Nada tendría de raro que el auriga Marcianus fuese un as de los circos de la época, pues su nombre consta también en un mosaico circense de Itálica y se repite en un grafito del teatro de la misma ciudad.

Por los colores que predominan en sus corseletes parece que Paulus pertenecía al equipo rojo (*factio russata*) y Marcianus al de los verdes (*factio prasina*), dos de las cuatro asociaciones que intervenían en los juegos —las dos restantes eran la blanca (*albata*) y la azul (*veneta*)—. Hay que decir que las carreras movilizaban enormes sumas de dinero. No sabemos si de Mérida misma, pero sí de Lusitania, procedía Diocles, *natione Hispanus Lusitanus*, el campeón de los aurigas romanos del siglo II y de cuantos lo habían precedido. Al retirarse millonario a los cuarenta y dos años de edad, había vencido 1462 veces. En la inscripción que cuenta su historia se dice entre otras cosas: "Se mantuvo a la cabeza desde el comienzo hasta el fin de la carrera 815 veces; pasó del segundo lugar al primero, ganando la carrera, 67 veces; fue dejado atrás, recuperando después el primer puesto y ganando al final, 36 veces. En otros géneros de certámenes ganó 42 veces. En carreras difíciles venció al final, con un último esfuerzo, 502 veces; de ellas 216 corriendo para los verdes, 205 para los azules y 81 para los blancos. Hizo que nueve caballos llegasen a alcanzar cada uno más de cien triunfos y que dos caballos alcanzasen cada uno las doscientas victorias".

El buen romano apenas podía concebir otra vida que la de la ciudad, pero en cambio sus ingresos más apreciados eran los derivados de una explotación agrícola bien llevada. Aunque el comercio y la banca (o la usura) eran aceptados como actividades lícitas, sus réditos se consideraban menos limpios y honorables que los del político y terrateniente en una pieza. En el preámbulo de su tratado clásico *de agricultura* el adusto Catón recomienda a sus lectores, dando por supuesta la residencia habitual de los mismos en el marco de una ciudad, que se construyan una acogedora villa en la finca de su propiedad, para que sus estancias obligadas en ésta les resulten a la vez cómodas y gratas. El consejo dado en el siglo II a.C. fue puntualmente seguido en las centurias sucesivas, y particularmente en la época de recuperación económica que se inicia con Diocleciano y se consolida bajo Constantino. De esa dorada era otoñal del imperio romano quedan espléndidas *villae* repartidas por toda la Península Ibérica, algunas de ellas gérmenes de poblaciones que aún hoy conservan el nombre de sus antiguos poseedores.

Los restos de una de tales *villae* han sido excavados por J. M. Alvarez en las proximidades de Mérida, en los terrenos de una dehesa denominada Las Tiendas. Sus restos se encuentran ahora repartidos entre la Alcazaba y el Museo de Mérida. En ellos se aprecian a la par el buen gusto artístico y el poder económico del constructor de la villa. Como para muchos de sus coetáneos, uno de sus esparcimientos favoritos era la caza. Seguramente sabía de memoria aquel epigrama de Marcial (I,49) dedicado a Liciniano. A la llegada del invierno, cuando desde el Moncayo soplaba el aquilón, Liciniano abandonaba la tierra celtibérica para retirarse a la templada costa de Tarragona. Allí daba caza con redes a los gamos y a los jabalíes de su finca o fatigaba liebres a caballo, dejando desdeñoso los ciervos para el capataz y la servidumbre (*cervos relinques vilico*).

Como quiera que fuese, el dueño de Las Tiendas se hizo representar como Meleagro, alanceando a pie firme un enorme jabalí, en el mosaico de un espacioso triclinio. En el piso de otra habitación tal vez lo volvamos a encontrar, ahora a caballo, dando caza a una pantera. Si este episodio era parte de su biografía, tuvo que vivirlo en Africa. ¿Sería él oriundo de Africa o habría ido allí invitado a

una cacería de fieras como sucedía en el sur de España desde tiempo inmemorial? No hay modo de averiguarlo. Lo curioso es que los mosaicos de su casa tienen un fuerte sabor africano tanto por su temática como por su estilo. El mosaico de la cacería del jabalí, evidentemente el de mayores pretensiones y precio, lleva una bordura con una hermosa guirnalda en la que están intercalados los bustos de las cuatro estaciones, símbolos de la prosperidad y del bienestar.

Cada estación va provista del correspondiente letrero. Es digno de notar cómo en estos nombres el latín vulgar, hablado, va imponiéndose sobre el latín clásico. La primavera no aparece como *ver* sino como *viranus*, el precursor de nuestro "verano"; el estío, *aestas*, se encuentra escrito *hestas*; *autumnus* está bien, y el romance castellano lo conserva en su "otoño"; el invierno, que en óptimo latín es *hiems*, desciende al *(hibernus)* que en las lenguas romances se impuso sobre el término clásico.

El otoño está representado por una joven rubia, peinada a la moda del siglo IV, con los racimos de uvas propias de la estación en su tocado. Es probable que tengamos en ella el retrato de una de las mujeres de la casa, tal vez la hija u otro familiar del dueño. Al invierno lo personifica una dama con cierto aire de mora o de judía. No sería de extrañar que su rostro, tan personal, correspondiese a otro miembro de la familia.

Verosímiles retratos, aficiones, deportes, ideas y creencias se reflejan en un arte que no es mera decoración, ni lujo, aunque en su



ALEGORIA DEL OTOÑO en la bordura de la escena de caza. La joven está peinada al uso de la época y pudiera ser el retrato de una mujer de la casa. La inscripción del fondo –*Autumnus*– pudiera parecer una redundancia, pues todo el mundo sabía en Roma y en el mundo romano que el Otoño solía estar representado por un joven o una muchacha coronada de pámpanos y racimos. Pero a la inscripción hay que tomarla por lo que es: un elemento de la decoración del fondo. Es como una de esas palabras que en el verso griego o latino son intraducibles, pero necesarias. Los mosaicos del Bajo Imperio fueron dados a encerrar inscripciones, cortas o largas.

tiempo fuese sentido como tal, sino testimonio histórico de múltiples facetas de la vida antigua. En medio de tanta destrucción como han sufrido los monumentos romanos, los duros y resistentes mosaicos nos transmiten de cuando en cuando estupendos mensajes. Ahí tenemos al dueño de la casa, no sólo en efigie, sino vestido como solía, con las ropas salpicadas de discos (*orbiculi*), usuales en el Bajo Imperio.

Pero el señor de Las Tiendas —llamémosle así dada nuestra ignorancia de su nombre genuino— debía sumar a la de la caza la afición a las alfombras, pues en los corredores y estancias de su casa hizo poner varios mosaicos que parecen alfombras petrificadas. En esto no hacía más que seguir una moda muy extendida, pero lo que en él sorprende es su exigencia en conseguir verdaderas obras maestras del género y que la tesela fuese mucho más pequeña (1 cm por término medio) de lo entonces corriente. Entre las varias facetas de su personalidad los mosaicos nos descubren, pues, otra muy acusada: su afán de perfección. Cuando pasados muchos años —un siglo quizá— los mosaicos se estropearon y alguno de sus sucesores trató de repararlos —como se observa en el centro del mosaico del jabalí—, no encontró, o no se molestó en buscar, artistas capacitados para labor tan delicada. De cualquier forma, el fin de la Mérida romana estaba próximo: inmersos en la oleada de los invasores germánicos, los suevos ya habían pasado el Rhin; Mérida caerá en su poder en el año 410.



MOSAICO GEOMETRICO de la misma villa de Las Tiendas. Muchos mosaicos se inspiran en alfombras, pero pocas veces la imitación resulta tan convincente como en este soberbio ejemplar, virtualmente íntegro.

¿Cuántos mosaicos romanos tenemos en Mérida? Yo he reunido 65 en un "corpus" que se acaba de publicar, pero no he incluido en él alguno que se ha partido y que sólo conocemos por dibujos; dos que proceden de excavaciones no realizadas por mí y que, por tanto, no me correspondía publicar; y uno que surgió cuando mi libro estaba en prensa. Alrededor de 70 mosaicos de pavimento podría decirse que ha dado Mérida hasta el momento. Tal vez sólo Itálica la iguale, hoy por hoy, con un número similar. Claro que estos números dependen de la extensión con que se realizan los trabajos arqueológicos y de los medios con que se cuenta para la conservación de los hallazgos. La situación de nuestro país es tal, que yo dudo mucho de que un arqueólogo profesional al que se preguntase cuántos mosaicos romanos había en España, se atreviese a aventurar una cifra; y sería ya, en mi opinión, un verdadero experto quien pudira decir, por ejemplo, "unos cuatrocientos" sin un margen de error de unos ciencuenta por cualquiera de los dos lados. Otro tanto podríamos hacer, y con los mismos resultados, en Italia, en Francia o en el Norte de Africa.

Para dar una visión clara, pormenorizada y global a la vez, del vasto campo del mosaico romano antiguo, se vienen publicando en los países interesados, "corpora" y monografías que hagan posible en el futuro contemplar una panorámica con mayor facilidad y seguridad que ha sido posible hasta el presente. Alemania y Suiza tienen el trabajo casi completo, y realizado a conciencia por sendos investigadores, K. Parlasca y V. von Gonzenbach, respectivamente. Francia —gracias a H. Stern—, Italia, Túnez y Argelia lo llevan muy adelantado. España, Portugal y otros países deben emparejarse con ellos.

De vez en cuando los especialistas se reúnen en coloquios; cambian impresiones; discuten y hacen públicas sus actas. El Centre Nationale de la Recherche Scientifique francés ha patrocinado ya dos importantes reuniones internacionales de esta especialidad reflejadas en otros tantos volúmenes enjundiosos.

La densidad y el número de mosaicos en un cierto territorio constituye por de pronto un índice de la intensidad de la presencia romana en el mismo, mucho más desde luego que un barómetro de la romanización. Un país como Galicia puede estar muy romanizado —así lo revela el riquísimo léxico latino de su lengua, inspirado y aprendido en el "Catón"— sin que la población de verdaderos romanos en el mismo haya sido muy densa. Un núcleo urbano romano de la importancia de Lugo apenas ha dejado ver un mosaico en los últimos siglos, y hay que ir a la provincia de Orense, lindando ya con el Limia fronterizo y con León y sus Médulas, para encontrar vestigios de pavimentos romanos de clase musiva. Las demás provincias de Galicia, Asturias Cantabria y Vasconia ofrecen el vacío o poco menos en este terreno. La frontera de los mosaicos por el norte, como la frontera de las estatuas y de la arquitectura clásicas, se fijó en el valle del Duero y en Navarra. El valle del Ebro, Cataluña, Levante, las dos Castillas, Extremadura, Portugal y Andalucía se vieron inmersas en la oleada de la colonización romana y son ricos veneros de mosaicos como de las demás manifestaciones refinadas de la civilización latina.

Cuando los repertorios de los mosaicos de cada una de estas provincias esté completo, podremos tener ideas claras de los temas predilectos en cada una de ellas, de la actividad de las escuelas de artesanos dentro y fuera de cada una, de la difusión y la extensión de las corrientes de la moda y de cómo la riqueza, en grande o pequeña parte, se invierte en el fomento de las artes suntuarias.

Cúmulos ricos de galaxias

Alrededor de un 10 por ciento de la totalidad de las galaxias pertenece a cúmulos ricos, sistemas compuestos de miles de miembros envueltos en gas caliente. Tales cúmulos son remolinos gravitatorios con galaxias gigantes cercanas a su centro

Paul Gorenstein y Wallace Tucker

En la naturaleza parece existir una tendencia fundamental a agruparse entre sí cosas de la misma clase, dando como resultado unidades de una nueva clase de orden superior. En el mundo inanimado, las partículas elementales se reúnen para formar átomos, los átomos para formar moléculas, los átomos y moléculas para formar estrellas y planetas, y así en orden ascendente hasta llegar a las galaxias y los cúmulos de galaxias. Los límites del conocimiento humano se encuentran en ambos lados de la jerarquía. Es posible que las partículas subatómicas sean asociaciones de las entidades conocidas como quarks y que los cúmulos de galaxias estén a su vez reunidos en unas asociaciones todavía mayores conocidas como supercúmulos. Dichos cúmulos de galaxias presentan especial interés porque son el último nivel firmemente establecido en la cima de la jerarquía. En palabras del astrónomo Fritz Zwicky, que ayudó a establecer su existencia, "constituyen el último escalón para el estudio del universo en su conjunto". Proporcionan un laboratorio de varios millones de años luz de diámetro para estudiar la interacción de gases, estrellas y galaxias en una escala grandiosa. Como resultado, han atraído la más cuidadosa atención de astrónomos dedicados a la observación del universo en las longitudes de onda de radio, luz y rayos X del espectro electromagnético.

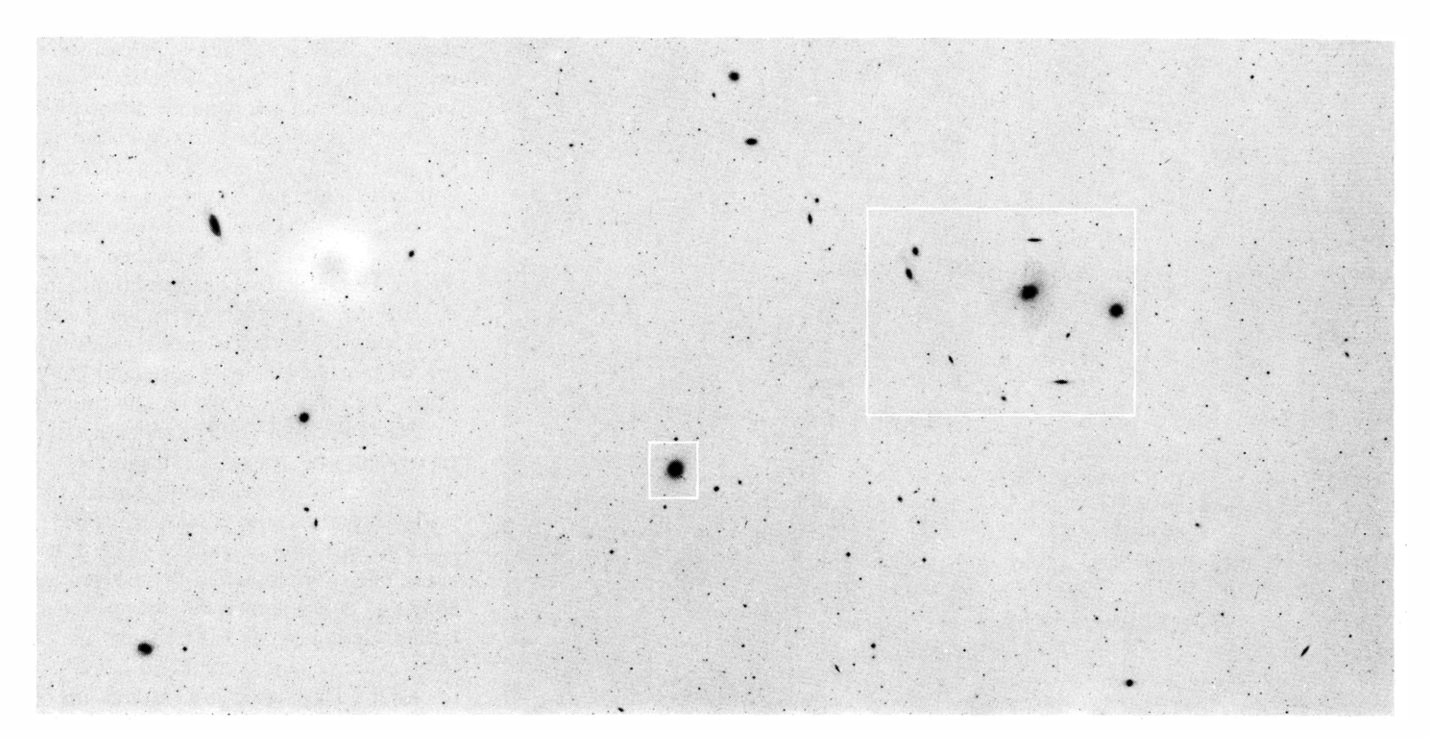
A lo largo de los últimos cincuenta años, los grandes telescopios han revelado millares de cúmulos ricamente poblados, cada uno de los cuales consta de miles de galaxias formadas a su vez por decenas de millares de millones de estrellas. En comparación, nuestra propia galaxia es un miembro de un grupo muy pequeño conocido como grupo local y constituido por no más de dos docenas de galaxias, la mayoría de ellas mucho menores que la nuestra. El estudio de varios cúmulos ricos ha mostrado que la mayor parte de los miles de galaxias que los componen están viajando a través del espacio a velocidades de miles de kilómetros por segundo. La alta velocidad de esas galaxias y su densa distribución en el espacio implican que están ligadas entre sí por fuerzas gravitatorias mucho mayores que las que pueden explicarse a partir de la masa visible, es decir, la masa correspondiente a los objetos visibles en las placas fotográficas.

Recientes observaciones en longitudes de onda de radio y rayos X han revelado que el espacio entre galaxias en los cúmulos ricos está relleno de gas caliente y que en ciertas galaxias elípticas gigantes que se encuentran hacia el centro de los cúmulos, se han producido titánicas explosiones que han expelido hacia el caliente gas intergaláctico vastas nubes de partículas subatómicas de alta energía. ¿Qué produce esas explosiones? ¿Cuál es el origen del gas caliente? ¿Dónde está la masa extra que hace falta para mantener unidas las galaxias emigrantes? Los astrónomos todavía no pueden aportar respuestas definitivas a esas preguntas, pero en los últimos años ha ido tomando forma el esbozo de un esquema que muestra cierta promesa de poder responderlas. De acuerdo con este esquema, las condiciones que descubrimos en los cúmulos ricos pueden explicarse como resultado de la interacción de gas, estrellas y galaxias en un vórtice gravitatorio generado por una densa concentración de galaxias en el centro del agrupamiento. Observaciones muy recientes han conducido a la extraordinaria sugerencia de que la galaxia gigante M87, situada cerca del centro de un gran cúmulo en la constelación Virgo, puede tener en su núcleo un agujero negro con una masa igual a la de cinco mil millones de soles.

Mucho tiempo antes de que se admitiera que lo que ahora se llaman galaxias eran "universos aislados", o sistemas independientes de estrellas, los astrónomos habían notado una tendencia de las "nebulas" o nebulosas a agruparse. Esta tendencia a reunirse se aprecia en un mapa del cielo que representa las posiciones de más de 11.000 objetos nebulares relacionados en el *Nuevo Catálogo General* (NCG) de J. L. E. Dreyer, que se publicó hacia el final del siglo XIX. Hacia la década de 1920 quedaba ya claro que la mayor parte de los objetos clasificados como nebulosas en el catálogo eran en realidad galaxias, y muchas de ellas son todavía mejor conocidas por el número asignado por Dreyer en el NCG. Las exploraciones detalladas que se realizaron en la década siguiente revelaron que, en términos generales, las galaxias están distribuidas uniformemente, tanto en ángulo alrededor del cielo como en distancia. Por otra parte, el aparente agrupamiento de las galaxias comparativamente próximas que había sido observado en los antiguos mapas del cielo se mantenía a distancias mucho mayores.

En 1933, Harlow Shapley publicó un catálogo de 25 cúmulos de galaxias, y propuso que tales agrupamientos no eran meras coincidencias de posición, sino asociaciones físicas que se producían a causa de procesos evolutivos. En el mismo año, Zwicky publicó un estudio de la distribución de las galaxias en el gran cúmulo de la constelación Coma Berenices, sugiriendo que las galaxias estaban permanentemente ligadas por su mutua atracción gravitatoria. Zwicky señaló, sin embargo, que no bastaba la cantidad de masa realmente observada en la forma de las galaxias para dar cuenta de la intensidad requerida del campo gravitatorio. Se introdujo así el problema de la "masa perdida" en el estudio de los cúmulos de galaxias.

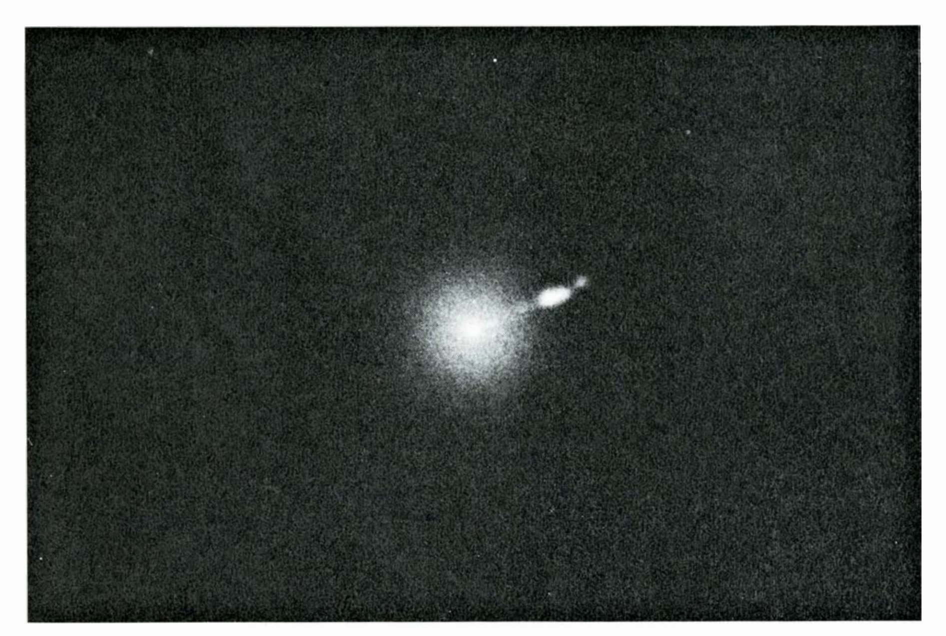
Se cree ahora, sin reticencias reseñables, que al menos la mitad de todas las galaxias en el universo son miembros de un grupo o de un cúmulo de un tamaño u otro, variando desde los grupos pobres en galaxias, como el nuestro, hasta los cúmulos ricos que constan de miles de galaxias. Las escasas 20 galaxias del grupo local están distribuidas en una esfera que tiene un diámetro aproximado de dos millones de años luz. En extremos opuestos del agrupamiento se encuentra nuestra galaxia y la Gran Nebulosa de Andrómeda, la galaxia M31. Son grandes galaxias espirales que contienen juntas el 70 por ciento de la masa en el grupo local. Hay mucho espacio vacío en el grupo: la probabilidad de que nuestra galaxia chocara alguna vez con la de Andrómeda es próxima a cero. El tipo más común de asociación galáctica está formado por pequeños grupos con mucho espacio vacío. Los cúmulos grandes y los cúmulos ricos, ambos con 1000 o más



EL CUMULO DE GALAXIAS en la constelación Virgo es típico de un cúmulo grande, pero irregular, que contiene más de 1000 galaxias individuales. En este negativo de una fotografía hecha con el telescopio Schmidt de 48 pulgadas (122 cm) en el Monte Palomar, las galaxias se pueden reconocer por su aspecto velludo. Las imágenes puntuales son producidas por estrellas de nuestra propia galaxia. Sólo alrededor de una quinta parte del cúmulo aparece en la fotografía, que muestra una región de 4,5 grados de anchura, equivalente a cinco millones de años luz a la distancia del cúmulo de Virgo (60 millones de años luz). El área dentro del rectángulo mayor aparece en la fotografía inferior. La gran galaxia dentro del rectángulo menor es la galaxia elíptica gigante M87, que emite intensamente en las regiones de radio y rayos X del espectro. En los últimos 50 años se han descubierto millares de cúmulos ricos de galaxias.

DETALLE DEL CUMULO DE VIRGO, mostrado en esta copia positiva de una fotografía hecha con el telescopio de cuatro metros del Observatorio Interamericano de Cerro Tololo, que opera en colaboración con el Observatorio de Kitt Peak. Los objetos más grandes son las galaxias elípticas M84 y M86.





DOS VISTAS DE M87, la galaxia elíptica gigante en el cúmulo de Virgo, que revelan dos notables aspectos de una de las más brillantes galaxias conocidas. La fotografía superior, hecha con largo tiempo de exposición mediante el telescopio de cuatro metros de Cerro Tololo (Chile), muestra algunos de los más de 500 cúmulos globulares que pueblan el "halo" que rodea a la galaxia. Cada cúmulo es una asociación esférica de más de 100.000 estrellas. En la toma de abajo, de exposición mucho más corta, hecha con el telescopio de 305 centímetros del Observatorio Lick, se puede ver un chorro luminoso, de 6000 años luz de largo, saliendo del centro de la galaxia. Estudios ópticos recientes sugieren la presencia de un objeto compacto, posiblemente un agujero negro, en el centro de la galaxia con una masa de cinco mil millones de veces la masa del Sol.

miembros, sólo corresponden a aproximadamente un 10 por ciento de la totalidad de las galaxias. Un cúmulo rico se define como un gran cúmulo que tiene una densidad de galaxias desusadamente alta en su centro.

La actividad de alta energía en la forma de emisiones de ondas de radio y de rayos X se da con la máxima claridad en agrupamientos grandes. El más próximo de ellos es el de Virgo, a una distancia de unos 60 millones de años luz. Tiene forma irregular y cubre unos 100 grados cuadrados en el cielo; un libro de tamaño corriente sostenido con el brazo estirado la cubriría justamente. Consta de al menos 1000 galaxias; la mayoría de ellas, grandes galaxias espirales y galaxias elípticas enanas. Sus miembros más brillantes son galaxias elípticas gigantes.

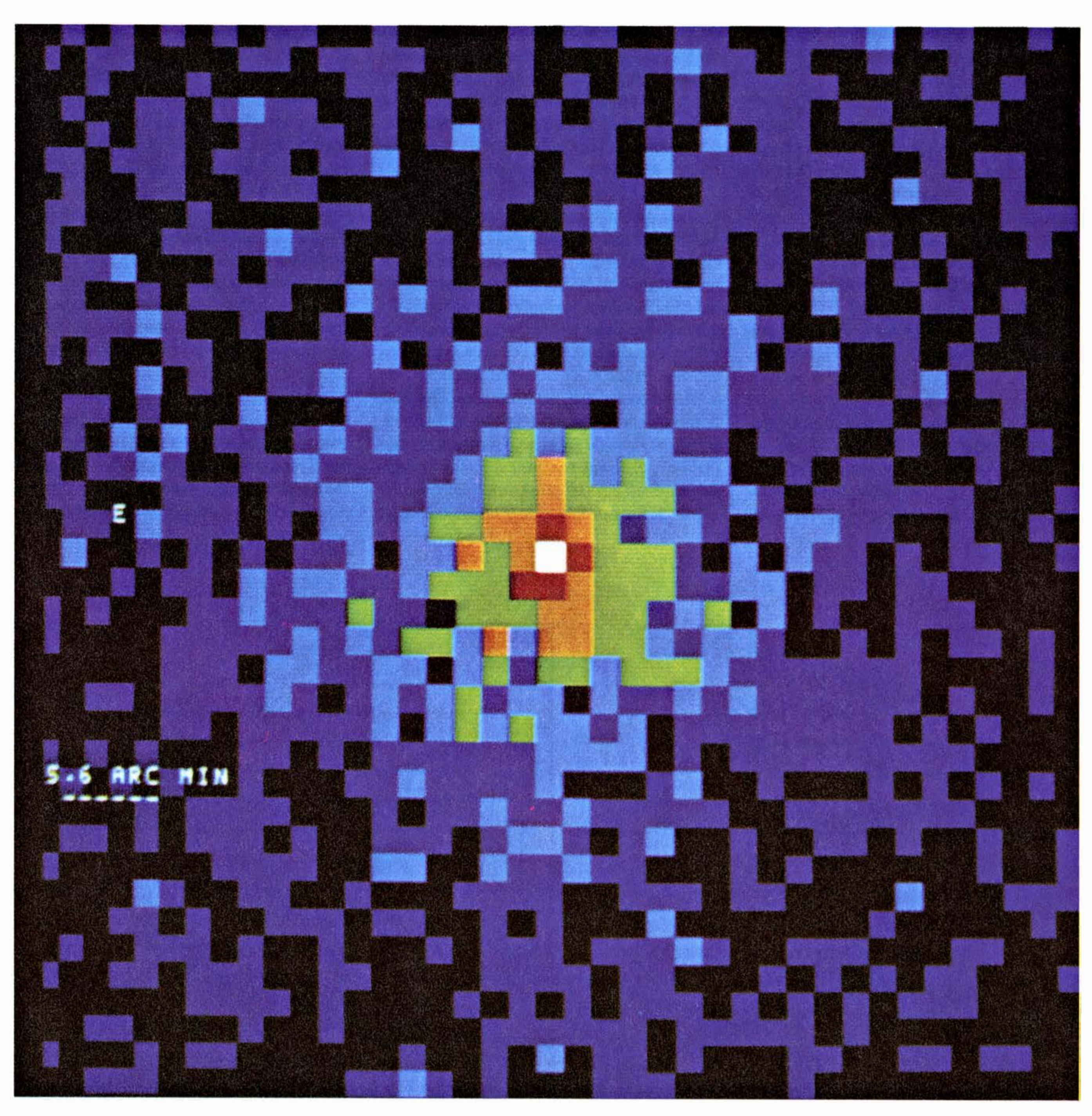
La galaxia elíptica gigante M87 es tres veces más luminosa que la nuestra, que consta al menos de cien mil millones de estrellas. Del núcleo de M87 emana una característica peculiar, como un chorro de unos 6000 años luz de largo, que es una intensa fuente de emisiones ópticas y de radio de carácter no térmico. Por "no térmico" entendemos que la energía emitida carece de las características espectrales de la energía emitida por un cuerpo caliente. Una fuente de emisión óptica y de radio de carácter no térmico son los electrones que viajan en el interior de intensos campos magnéticos.

La explicación generalmente aceptada para el chorro es que fue expulsado del núcleo de M87 en una violenta explosión o serie de explosiones que comenzaron un millón de años antes de la época en la que ahora se observa el chorro. La intensa radiación no térmica de radio y rayos X y otras pruebas de actividad explosiva se aceptan en la actualidad como una característica común a muchas galaxias elípticas y otros objetos astronómicos peculiares, en particular los quasars. El origen de tal actividad explosiva, en la que con frecuencia se libera energía a un ritmo de un billón de veces el del Sol, es uno de los más importantes enigmas de la astronomía de hoy.

Los detectores de rayos X, transportados por encima de la atmósfera terrestre por el satélite *Uhuru*, revelaron que M87 está envuelta por una nube emisora de rayos X de un diámetro de casi un millón de años luz. El espectro de la fuente de rayos X fue posteriormente analizado por el instrumental a bordo del satélite británico *Ariel 5* y por el satélite *OSO-8* de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA). De la presencia de ciertas líneas de emisión de hierro altamente ionizado se puede deducir que los rayos X surgen de un gas difuso cuya temperatura es de unos 30 millones de grados Kelvin. Al menos los rayos X son entonces generados por una fuente que es térmica más bien que no térmica.

Si un gas caliente no está confinado de alguna manera, tiende a expandirse indefinidamente. En ausencia de una fuerza que lo impidiera, la nube gaseosa alrededor de M87 se dispersaría en unos 100 millones de años. Aunque esto pueda parecer mucho tiempo, constituye sólo el uno por ciento de la duración total de la vida de una galaxia. Existen tres posibilidades para explicar la existencia de la nube gaseosa tal como se observa hoy: bien existe alguna fuerza que confina el gas a la galaxia, bien el gas se está renovando continuamente a medida que se expande, o bien la galaxia se encuentra en un punto especial de su historia, antes de que el gas haya tenido tiempo de disiparse. La tercera alternativa es posible, pero bastante improbable. La segunda no solamente requiere una exorbitante cantidad de energía, sino que también implica que la nube caliente debe extenderse a un volumen mucho mayor en el espacio que el que en realidad ocupa. Queda, pues, como la más probable explicación el que el gas sea retenido por una fuerza, esto es, la gravedad.

A partir de la distribución de la intensidad de los rayos X de la superficie del gas puede estimarse la distribución del gas en el espacio. De dicha distribución se deduce que la masa necesaria para el confinamiento gravitatorio del gas puede estimarse en al menos 50 billones de veces la masa del Sol. Esta masa es varios cientos de veces la masa observada en el disco de las grandes galaxias espirales, tales como la nuestra y la de Andrómeda, y unas 30 veces mayor que las estimas previas de la masa de M87. Existe otra indicación que apoya la conclusión de que M87 es una galaxia extremadamente



HALO DE RAYOS X ALREDEDOR DE M87, registrado con un cohete portador de un telescopio de rayos X que había sido proyectado por uno de los autores (Gorenstein) y sus colaboradores en el Centro de Astrofísica del Observatorio del Harvard College y el Observatorio Astrofísico Smithsoniano. En esta imagen de ordenador realizada en falso color, cuanto más claro es éste, mayor es la intensidad de los rayos X. El área cubierta por la imagen tiene aproximadamente un millón de años luz de ancho, o una quinta parte de la anchura de la totalidad de la región representada en la fotografía superior de la página 55. El bloque central de tres por tres cuadrados corresponde aproximadamente a la masa luminosa de M87 en la foto superior de la página anterior.

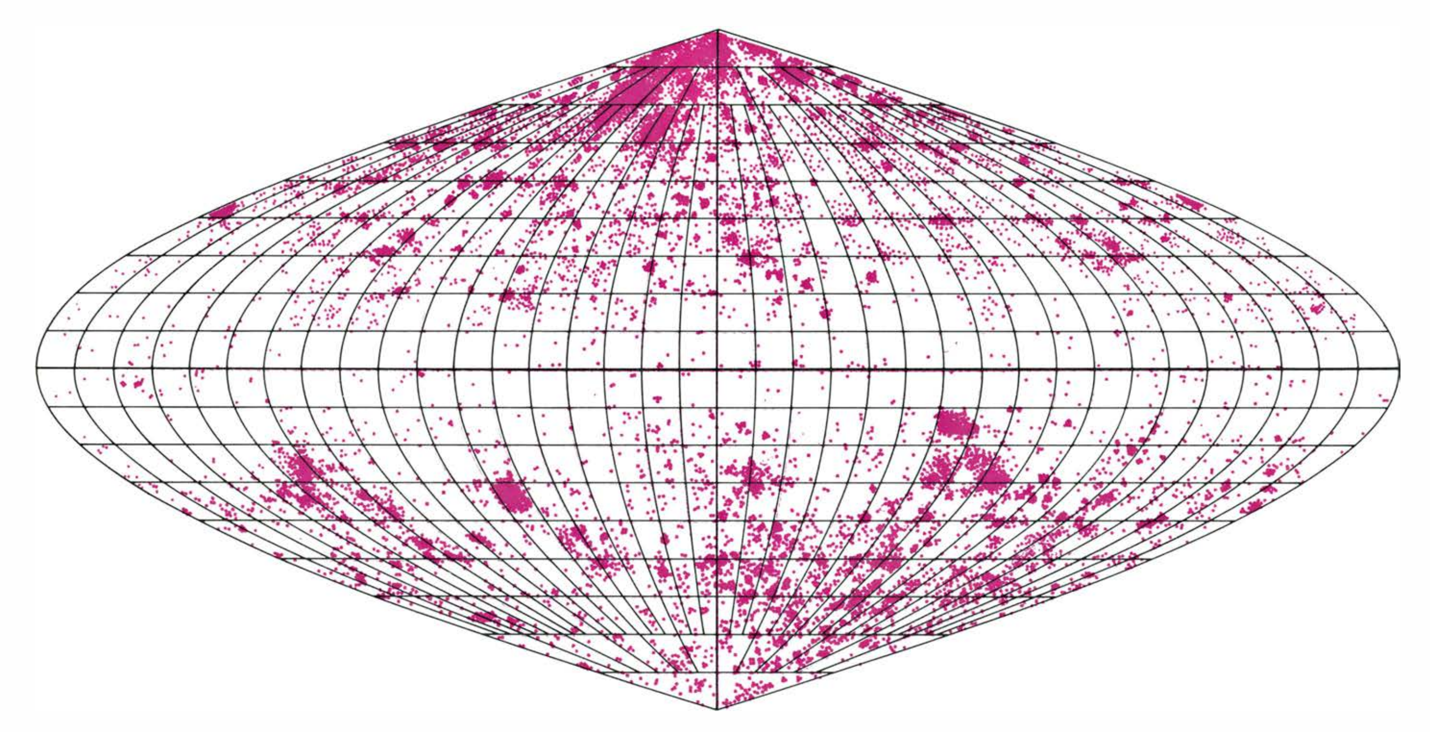
masiva. En 1969, Gerard de Vaucouleurs, de la Universidad de Texas en Austin, y Halton C. Harp y Francesco Bertola, de los Observatorios Hale, dieron cuenta independientemente de la detección de un débil "halo" óptico, o corona, alrededor de M87. El halo se extiende hasta distancias del orden de medio a un millón de años luz desde el centro de la galaxia. El análisis espectral sugiere que la mayor parte de la radiación óptica en el halo procede de estrellas y no de un gas caliente o de una nube de electrones de alta energía. Para que esas estrellas estén ligadas gravitatoriamente a la galaxia se necesita una masa galáctica de varias decenas de billones de masas solares, lo que concuerda con las estimas deducidas a partir de observaciones de rayos X.

La necesidad de asignar masas muy grandes a las galaxias elípticas gigantes es importante para la cosmología, por cuanto puede dar solución al viejo problema de la masa perdida en los cúmulos de galaxias. El problema originalmente planteado por Zwicky, en su estudio del gran cúmulo situado en Coma Berenices, es común a todos los grandes cúmulos. El cúmulo de Coma, que se encuentra a unos 400 millones de años luz de nuestra galaxia, presenta una densa concentración de galaxias en su centro. Además, un estudio cuidadoso pone de manifiesto que en el cúmulo de Coma, y en la mayoría de los cúmulos análogos, las galaxias se han agrupado en forma de bola.

En sí misma, esta forma plantea un problema. Por una parte, da la apariencia de haberse alcanzado un estado de equilibrio entre los movimientos al azar de las galaxias y su mutua atracción gravitatoria. Por otra parte, si se calcula la masa total de todas las galaxias en el cúmulo, se encuentra que sólo llega del 10 al 20 por ciento de la necesaria para proporcionar estabilidad gravitatoria. He aquí, pues, una paradoja. Si la gravitación del cúmulo fuese realmente tan débil como el recuento de galaxias parece indicar, las galaxias no estarían concentradas en una apretada bola de unos pocos millones de años luz de diámetro, sino que se hallarían distribuidas irregularmente en espacios de decenas de millones de años luz. Los astrónomos se resisten a suponer que en el centro de un cúmulo se estén creando, sin cesar, nuevas galaxias para mantener su densidad central observada o que esté actuando una fuerza cosmológica desconocida; por cuya razón se ven obligados a aceptar que la mayor parte de la masa en el cúmulo está todavía por descubrir. ¿Dónde se encuentra?

Una antigua hipótesis suponía que la masa estaba oculta en la forma de gas caliente ionizado, y se descubriría tan pronto como se pudieran hacer observaciones suficientemente sensibles con rayos X. Cuando por fin se realizaron las observaciones, con satélites dotados de detectores sensibles de rayos X, a principios del decenio de 1970, se descubrió que la emisión de rayos X constituía una característica común de los cúmulos ricos de galaxias. Como en el caso de M87, el análisis espectral indica la existencia de un gas caliente como fuente de los rayos X. Sin embargo, en el cúmulo Coma, la región emisora de rayos X tiene un diámetro de unos tres millones de años luz, que es más de tres veces la extensión de la región de emisión M87. La cantidad de masa en el gas caliente resultó ser comparable a la masa en las galaxias; así pues, no bastaba, ni de lejos, para mantener unido el cúmulo. Por otra parte, las observaciones con rayos X ofrecen un par de indicaciones adicionales de la existencia de la masa perdida. La primera es que, como en el caso de M87, la temperatura y el tamaño de la nube de gas caliente en el cúmulo de Coma pueden usarse para estimar la masa necesaria para mantenerlo confinado. Esta masa resulta ser del orden de la masa que hace falta para mantener unido el cúmulo.

La segunda indicación proviene de la dificultad de comprender cómo la nube gaseosa llegó a contener la cantidad de hierro que aparece en el espectro de emisión de rayos X. Por lo que se sabe, el hierro sólo puede formarse en el interior de una estrella y puede penetrar en el medio interestelar de una galaxia sólo cuando es expulsado por la explosión de una supernova. Cabe que una de estas explosiones arrojara hierro y otros elementos pesados al vasto espacio que media entre las galaxias, pero tales elementos podrían también ser arrastrados por la presión del "viento" creado por el movimiento de la galaxia en el interior del cúmulo o expelidos en la marea cataclísmica resultante de encuentros entre galaxias. Las estimas sobre el rendimiento de tales procesos, realizadas tomando como base los valores convencionales de las masas de las galaxias, mani-

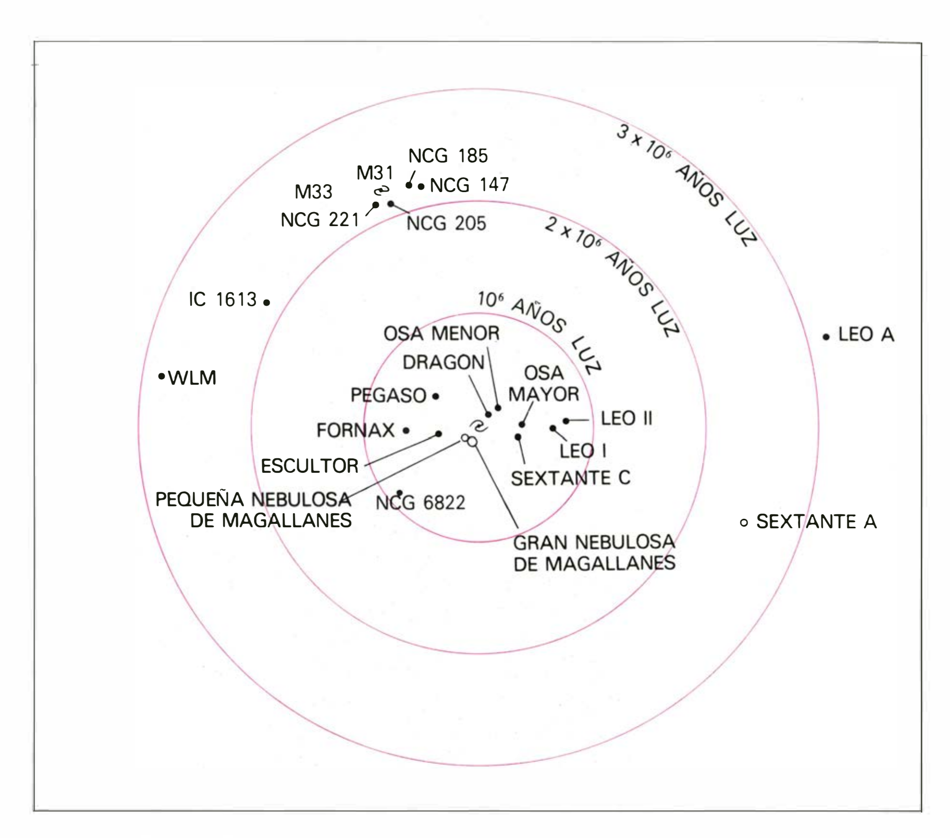


TENDENCIA DE LAS GALAXIAS a formar cúmulos, que ya se había hecho evidente en el siglo XIX antes de que se hubiera demostrado en forma concluyente que cada galaxia es un sistema de estrellas independiente. En 1921, C. V. L. Charlier construyó este mapa del cielo situando 11.475 objetos nebulares relacionados en el *Nuevo Catálogo General* de J. L. E. Dreyer, publicado en el decenio de 1890. Aquí el ecuador corresponde al plano central de nuestra galaxia. En la vecindad del plano central, los objetos extragalácticos están fuertemente obscurecidos por polvo, haciendo parecer que las galaxias aumentan hacia los polos. Se supone que éstas están distribuidas más o menos uniformemente en todas las direcciones, aparte de su tendencia a formar cúmulos.

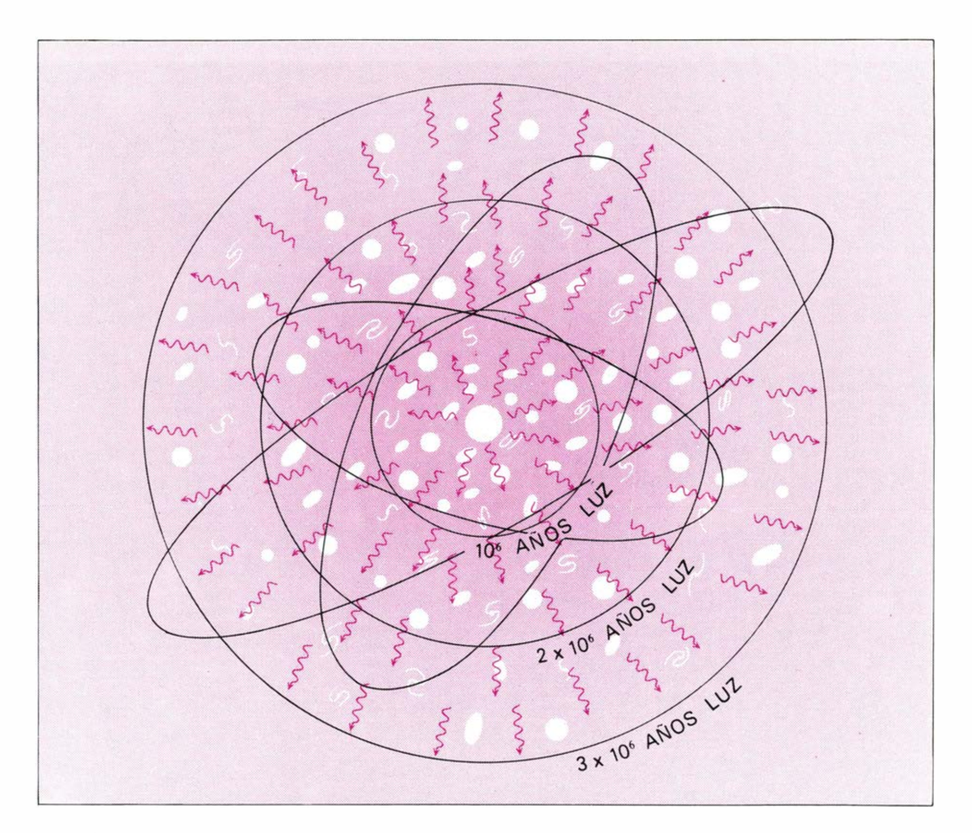
fiestan que la nube de gas caliente debería contener menos de un tercio de la cantidad de hierro observada. Se puede explicar la discrepancia de manera bastante sencilla suponiendo que la masa total en forma de estrellas es en realidad mucho mayor que la tradicionalmente estimada, de modo que la cantidad de hierro suministrada por las estrellas es, en proporción, mayor. Está ganando terreno la idea de que las estrellas adicionales están distribuidas en halos masivos de muy bajo brillo superficial alrededor de las galaxias supergigantes, como sucede en el caso de M87.

En 1964, Thomas A. Matthews, William W. Morgan y Maarten Schmidt, de los Observatorios Hale, pusieron de manifiesto que una característica común de muchos cúmulos ricos de galaxias, en particular de aquellos que albergan intensas radiofuentes, es la existencia de una galaxia elíptica supergigante situada en posición central y rodeada de un extenso halo. Recientemente, se ha hecho evidente que son precisamente esas galaxias las que están asociadas a cúmulos emisores de rayos X. El cúmulo A2199 (No. 2199 en el catálogo de cúmulos compilado por George O. Abell, de la Universidad de California en Los Angeles) constituye un ejemplo excelente. La brillante galaxia dominante en el centro del cúmulo es NCG 6166. Los astrónomos clasifican las galaxias tales como NCG 6166 en la forma "galaxias cD". La *D* significa una galaxia con un brillante núcleo elíptico rodeada por una extensa envoltura, que en el caso de NCG 6166 tiene un diámetro de más de dos millones de años luz. La *c* simboliza supergigante, notación heredada de los esquemas para la clasificación de estrellas. NCG 6166, que abarca un volumen mucho mayor que la galaxia de Andrómeda y tiene varios cientos de veces más estrellas, es una de las mayores galaxias del universo. El cúmulo rico A2199 es una intensa fuente de rayos X, similar a la del cúmulo de Coma. La nube emisora de rayos X rodea la galaxia cD, que es también una intensa radiofuente.

El cúmulo de galaxias de Perseo es otro cúmulo bien estudiado, pero no bien comprendido. También aloja una galaxia elíptica supergigante localizada en el centro, que es una intensa radiofuente y está rodeada por una nube emisora de rayos X y un masivo halo de estrellas. La fuente de rayos X está centrada sobre la galaxia elíptica gigante NCG 1275 y se extiende sobre una región cuyas dimensiones son aproximadamente las mismas que el halo de estrellas: tres millones de años luz. Como en el caso de los cúmulos del Coma y M87, el espectro de rayos X indica que el responsable de la emisión de rayos X en estas frecuencias es un gas caliente con la abundancia cósmica normal de hierro. La masa de gas caliente requerida para explicar la emisión de rayos X



GRUPO LOCAL DE GALAXIAS, que es el que incluye la nuestra. Consta de unas 20 galaxias de varios tamaños y formas dentro de un radio de unos tres millones de años luz, y presenta las características típicas de los cúmulos pequeños. Alrededor del 70 por ciento de la masa del grupo está contenida entre nuestra galaxia y la Gran Nebulosa de Andrómeda, M31, dos galaxias semejantes. Esta proyección del grupo sobre un plano fue realizada por Gerard de Vaucouleurs, de la Universidad norteamericana de Texas en Austin.



CUMULO RICO DE GALAXIAS, representado esquemáticamente; consta de más de mil sistemas de estrellas separados que están ligados entre sí por fuerzas gravitatorias dentro de un radio de unos tres millones de años luz. La densidad de galaxias crece hacia el centro. También lo hace la densidad del gas caliente (*en color*), que emite rayos X (*líneas onduladas*). En un cúmulo rico, las galaxias espirales sólo constituyen un 20 por ciento del número total de galaxias. La mayoría de las galaxias son elípticas. En el mismo centro de un cúmulo rico se encuentran generalmente galaxias elípticas gigantes, o galaxias cD. Un cúmulo rico puede contener radiogalaxias cabeza-cola (*véase la ilustración inferior de la página 62*).

es unas cuatro veces la masa de las galaxias en el cúmulo; de ahí que el problema de la producción del hierro a partir de las galaxias sea todavía más grave que en el cúmulo del Coma. El problema de la masa perdida también es más grave. La masa necesaria para el equilibrio es unas 20 veces mayor que la masa observada en las galaxias.

El cúmulo de Perseo incluye varias e intensas radiofuentes. En términos generales, la delimitación de radiofuentes cartografía aquellas regiones del espacio donde campos magnéticos de alta intensidad coinciden con gran población de electrones de alta energía, combinación que da por resultado fuertes radioemisiones de origen no térmico. Dos de las radiogalaxias prominentes presentan una forma cabeza-cola que sugiere la interacción de la fuente con el viento intragaláctico o, lo que es equivalente, el movimiento de las galaxias en el seno de un gas estacionario. Estudios ulteriores de las fuentes cabeza-cola por los astrónomos del observatorio radioastronómico de Westerbork, en Holanda, han conducido a la elaboración de un modelo en el cual la forma suavizada hacia atrás, como de renacuajo, se produce por el movimiento de una radiogalaxia activa a través de un gas caliente a velocidades de miles de kilómetros por segundo. La presión en el gas caliente concuerda con la densidad y temperatura necesarias para explicar la emisión de rayos X. Como podría esperarse, las fuentes de forma cabeza-cola no son exclusivas del cúmulo de Perseo, sino que se encuentran en cierto número de otros cúmulos, muchos de los cuales han sido detectados como sede de fuentes de rayos X.

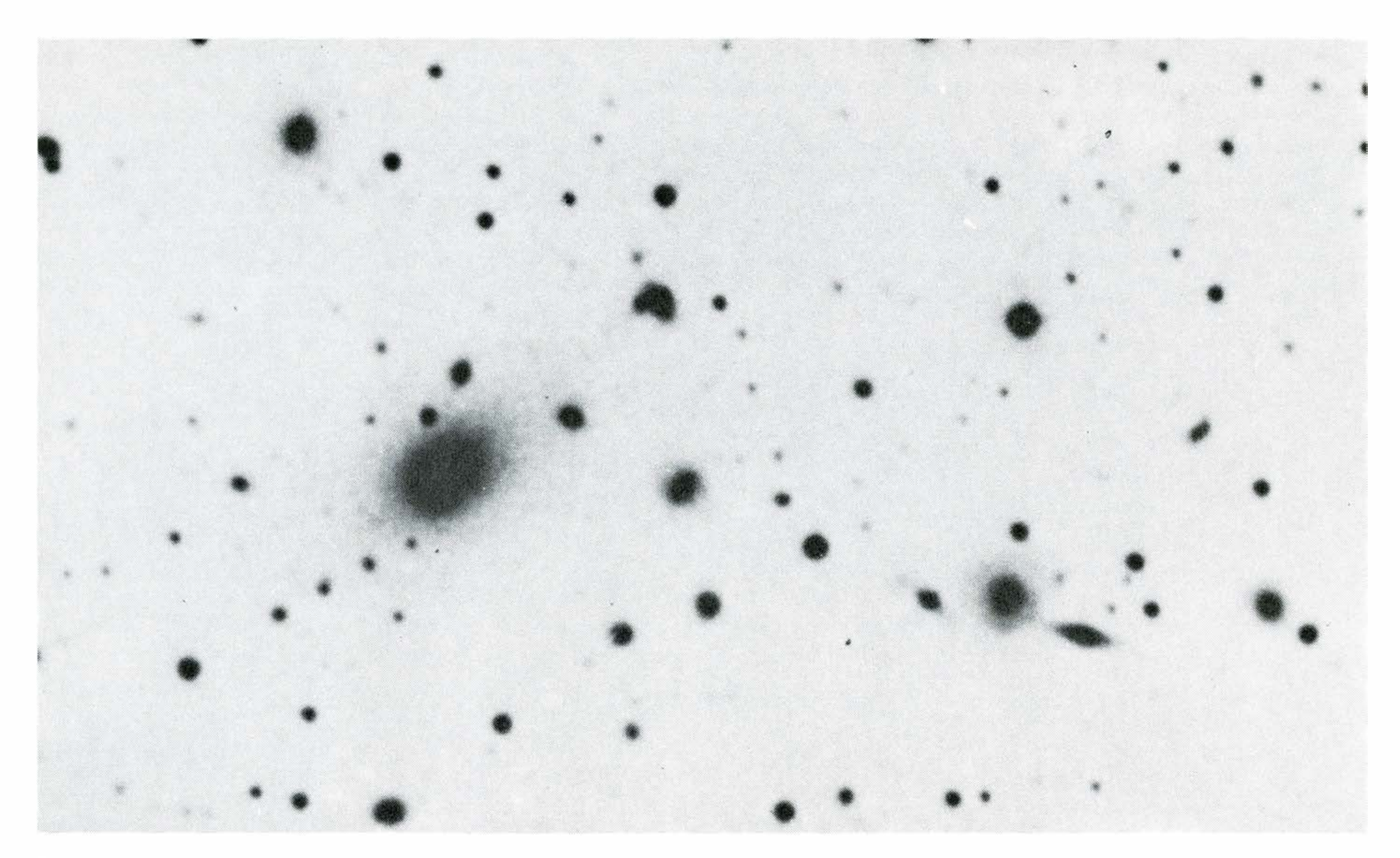
En resumen, a propósito de los cúmulos ricos de galaxias han quedado bien establecidos los tres hechos siguiente. En primer lugar, la masa necesaria para mantener los cúmulos gravitatoriamente ligados es unas 10 veces mayor que la masa observada en el cuerpo principal de las galaxias. En segundo lugar, los estudios de rayos X ponen de manifiesto que los cúmulos ricos contienen una considerable cantidad de gas caliente; la existencia del gas caliente se confirma por la estructura cabeza-cola observada de las radiogalaxias en tales cúmulos, y el confinamiento del gas caliente implica masas del orden de las necesarias para mantener el cúmulo unido. En tercer lugar, muchos cúmulos ricos contienen una galaxia supergigante localizada en el centro y rodeada de un halo extenso de estrellas débiles, y tales galaxias tienden a ser intensas radiofuentes.

El punto de vista de un creciente número de astrónomos es que todas las propiedades observadas de los cúmulos ricos son la consecuencia de un vórtice gravitatorio. El cúmulo rico típico tiene tres componentes importantes: galaxias, estrellas adicionales que forman un halo alrededor de una galaxia supergigante central y el gas caliente. Las galaxias de un cúmulo están en órbita alrededor de su centro de masa de una manera muy parecida a como los planetas del sistema solar están en órbita alrededor del Sol. En un cúmulo rico, las galaxias son tan grandes, tan numerosas y se hallan tan densamente distribuidas, que algunas de ellas inevitablemente encuentran a otras galaxias. En muchos de los encuentros, las galaxias no chocan frontalmnte, sino que sufren un ligero desvío al pasar una cerca de la otra.

El efecto acumulativo de esos muchos encuentros es una equipartición de la energía entre las galaxias; esto es, las galaxias que se mueven en el seno del mismo campo gravitatorio tienen la misma energía cinética, o energía de movimiento. La energía cinética es proporcional al producto de la masa por el cuadrado de la velocidad, de modo que una galaxia de mayor masa que el término medio se mueve más despacio que el término medio. Como resultado de la equipartición de la energía, la velocidad de una galaxia de gran masa no es suficiente para mantenerla en su órbita original, de modo que describe una espiral dirigiéndose hacia el centro de masa del cúmulo. La aceleración de la gravedad aumenta su velocidad de movimiento, pero los continuos encuentros impiden que adquiera una velocidad suficiente



CUMULO COMA, un cúmulo rico de galaxias situado en Coma Berenices; puede apreciarse en esta fotografía tomada con el telescopio de cuatro metros en el Observatorio Nacional de Kitt Peak. En 1933, Fritz Zwicky presentó pruebas de que las galaxias de este cúmulo se mantenían juntas debido a su mutua atracción gravitatoria. La cantidad de masa presente en forma de materia visible, sin embargo, es mucho más pequeña que la necesaria para la estabilidad gravitatoria. Parece que la mayor parte de la "masa perdida" se halla en los extensos halos de débiles estrellas que rodean a las grandes galaxias elípticas.



CUMULO RICO A 2199 (número 2199 en el catálogo compilado por George O. Abell de la Universidad de California en Los Angeles). Cerca de su centro tiene la galaxia elíptica supergigante NCG 6166, el objeto mayor de esta fotografía tomada con el telescopio Hale de cinco metros del Monte Palomar. NCG 6166 contiene un número de estrellas que es varios cientos de veces el de nuestra galaxia o la de Andrómeda. Se trata de una de las mayores galaxias que existen. Situada a unos 600 millones de años luz, emite fuertemente tanto en la región del espectro correspondiente a rayos X como en la región de radio.

para estabilizar su órbita, y así va cayendo inexorablemente hacia el centro de masa. Con el tiempo, las fuerzas gravitatorias que ligan las estrellas a la galaxia que se mueve hacia dentro quedan superadas por la gravedad combinada de las galaxias situadas en el núcleo del cúmulo. De las misma manera que el océano es obligado por la Luna a retirarse de la costa en la marea baja, las estrellas son alejadas de su galaxia madre. Las más exteriores de ellas son las primeras en retirarse. Las teorías de la formación de galaxias indican que las estrellas exteriores serán débiles y tendrán una masa substancialmente inferior a la del Sol. (Las estrellas más pesadas habrán caído hacia el centro de gravedad de la galaxia mediante el mismo proceso que produce el que las galaxias caigan hacia el centro del cúmulo.) Consecuentemente, las débiles estrellas exteriores quedarán atrás a medida que la galaxia se hunde hacia el vórtice, perdiendo más y más estrellas a lo largo del camino. Con el tiempo, la totalidad de la galaxia será despedazada por las mareas, y las estrellas restantes quedarán ligadas al halo de una gran galaxia situada en el centro del cúmulo.

En el curso de los diez mil millones de años de existencia del cúmulo, una galaxia situada en el fondo del pozo de potencial gravitatorio en el centro del cúmulo puede haber crecido hasta un tamaño colosal por asimilación de fragmentos de cientos de galaxias. Esta parece ser la explicación más probable del extenso halo de extrellas alrededor de las galaxias cD. El despojo de estrellas por las mareas en un proceso gradual, aunque se hace más intenso a medida que la galaxia que cae hacia dentro se acerca al núcleo del cúmulo. No hay que esperar que todos los pedazos sean capturadas en la inmediata vecindad de la galaxia cD central. Algunos de ellos se incorporarán a otras grandes galaxias. Por la misma razón, hay que esperar que el halo de las galaxias cD no se corte de una forma brusca, sino que su densidad decrezca gradualmente con la distancia al centro del cúmulo. Recientes exploraciones fotográficas de la región central de cúmulos ricos indican que éste es el caso. Los halos de las galaxias cD se pueden extender un millón de años luz o más, hasta el borde del propio cúmulo. La masa perdida puede haber sido hallada, escondida en cuatrillones de estrellas de pequeña masa que han sido arrancadas de galaxias, unidas al halo de la galaxia cD y distribuidas por toda la extensión del cúmulo. Puesto que están dispuestas de esta manera, las estrellas de baja masa resultan menos visibles de lo que serían si estuvieran concentradas en el cuerpo principal de las galaxias.

La asociación de la emisión de rayos X con las galaxias cD parece una consecuencia natural de las condiciones en los cúmulos ricos. Como resultado de la elevada concentración de galaxias en tales cúmulos, se dan dos condiciones que conducen a la creación de fuentes de rayos X. Una de ellas es la inyección de grandes cantidades de gas procedente de las galaxias en el medio intercumular. El otro es el crecimiento de la galaxia cD en el centro del cúmulo por acumulación de pedazos de otras galaxias. La fuente de rayos X se crea cuando el gas se calienta por compresión al ir cayendo en el pozo gravitatorio alrededor de la galaxia cD, en el centro del cúmulo.

Aunque este proceso alcanza su máxima eficacia en el centro de los cúmulos, podría actuar en menor escala allá donde exista una gran galaxia. Un ejemplo es un cúmulo irregular tal como el de Virgo. Una galaxia que en un comienzo sea suficientemente grande, como la M87, arrancará estrellas de las galaxias que pasen cerca de ella y las asimilará en un halo extenso. De la misma manera, el gas puede ser capturado y calentado a medida que cae hacia la galaxia, creando una fuente de rayos X. La fuente no será tan intensa como las del centro de un cúmulo rico porque tendrá una menor cantidad de gas de la cual extraer energía

La asociación de fuertes radiogalaxias con cúmulos ricos y galaxias supergigantes parece contradecir, a primera vista, esta panorámica. Las radiogalaxias muestran inequívocos signos de actividad explosiva que ha arrojado materia hacia fuera violenta-

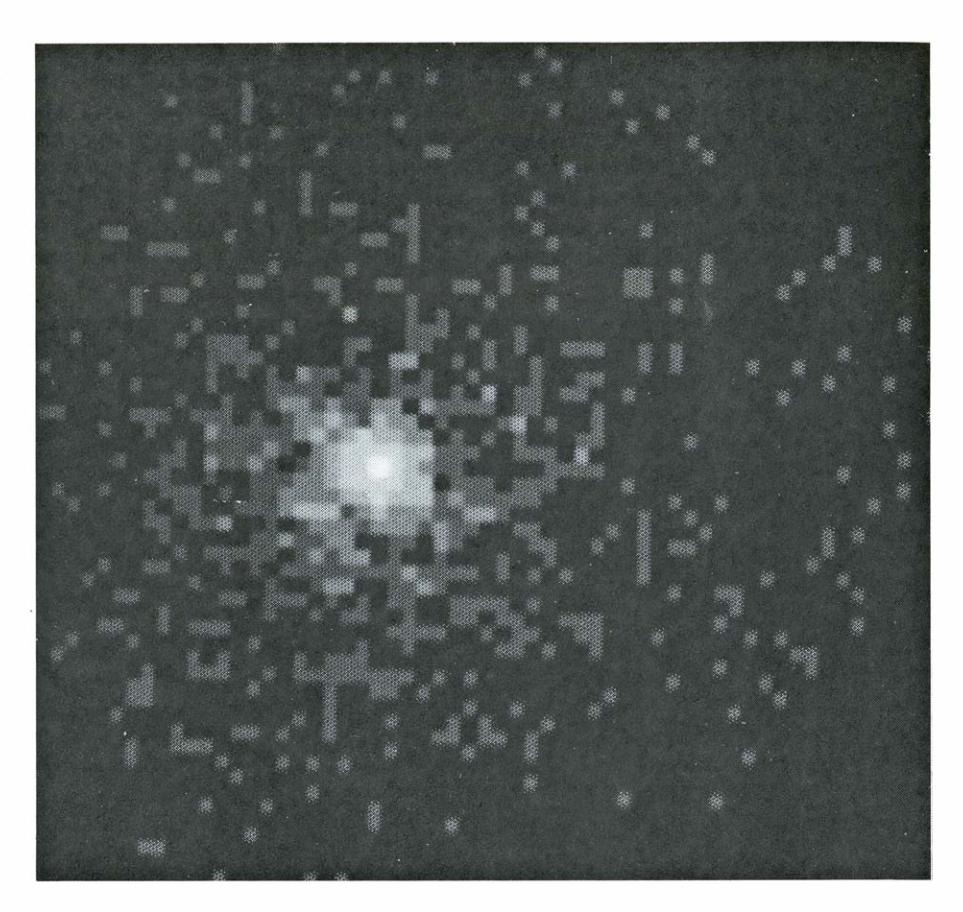
CUMULO DE GALAXIAS DE PERSEO, situado a 17 grados del plano central de nuestra galaxia, lo que explica el gran número de imágenes de estrellas que muestra esta fotografía, tomada con el telescopio Schmidt de 122 centímetros. El cúmulo tiene en el centro una galaxia elíptica supergigante, la NCG 1275 (*véase el mapa inferior*), que es una intensa radiofuente rodeada por una gran nube de gas caliente, emisora de rayos X, y por un halo de estrellas.

INTENSAS RADIOFUENTES en el cúmulo de Perseo, identificadas en este mapa, que cubre la misma área que la de la fotografía superior. La galaxia elíptica supergigante NCG 1275 es la radiofuente más intensa. Las isolíneas de las otras dos galaxias NCG 1265 e IC 310 presentan la característica forma cabeza-cola que indica movimiento relativo entre ellas y el medio intergaláctico. El mapa fue construido por Simon Mitton y Martin Ryle, de Mullard. La delimitación de radiofuentes cartografía aquéllas regiones donde campos magnéticos de alta intensidad coinciden con gran población de electrones de alta energía.

mente, mientras que la teoría de las galaxias supergigantes y las fuentes de rayos X requiere que haya materia cayendo hacia el interior. ¿Se pueden reconciliar las dos explicaciones? ¿Puede un colapso desembocar en una explosión? Un creciente número de astrónomos creen que sí. Hay indicios de que si la densidad de estrellas en el núcleo de una galaxia se hace suficientemente elevada, las estrellas empiezan a soldarse y derivar hacia el centro de la galaxia, formando un objeto supermasivo, de una manera muy parecida a como se cree que las galaxias gigantes se forman en el centro de los cúmulos. La diferencia estriba en que, en el núcleo de las galaxias, el objeto supermasivo puede ser un agujero negro, o región del espaciotiempo donde las fuerzas gravitatorias son tan grandes que la materia es literalmente aniquilada por aplastamiento. En el interior de un agujero negro, tanto las estrellas como los átomos, e incluso la partículas nucleares, quedan destruidos por enormes fuerzas gravitatorias. Se ha sugerido que en el centro de las galaxias activas puede haber un agujero negro de una masa de cien millones de veces la del Sol. Tal agujero negro crece al ritmo de una masa solar por año a medida que captura materia y la arrastra hacia dentro.

En posible confirmación de esta audaz hipótesis, la galaxia con el chorro, estudios muy recientes de M87, han puesto de manifiesto que tanto el brillo óptico de la galaxia como la velocidad de las estrellas en ella crecen rápidamente hacia el centro. Las observaciones indican que en el núcleo de la galaxia hay un objeto compacto, quizás un agujero negro, con una masa de cinco mil millones de veces la del Sol.

Al no poder escapar la materia capturada por un agujero negro, el recurso a éste no parece sirva de mucho para explicar una explosión. La respuesta a esta objeción puede estribar en la resistencia que opone la materia a ser aplastada. A medida que la materia describe su espiral hacia el agujero negro, los campos magnéticos que lo acompañan se deforman y amplifican. La acumulación de energía resultante puede dar lugar entonces a la actividad explosiva observada. En nuestra galaxia se pueden encontrar ejemplos de procesos similares en menor escala. Hay un sistema binario emisor de rayos X, conocido como Cyg X-1, en la constelación del Cisne, que probablemente está formado por un agujero negro de unas pocas masas solares que describe una órbita de radio muy pequeño en torno a una estrella gigante. La materia fluye de la envoltura externa de la estrella hacia la región de intensa gravitación alrededor del agujero negro; la energía gravitatoria alimenta la generación de ondas de choque turbulentas y calentamiento viscoso. El resultado es una fuente de rayos X rápidamente fluctuante y una radiofuente variable. Tales procesos, que actúan a escala galáctica, pueden explicar los chorros, dobles radiofuentes y otros signos de actividad explosiva en galaxias activas.



LA EMISION DE RAYOS X, procedente del cúmulo de Perseo, registrada con un telescopio de rayos X a bordo de un cohete por uno de los autores (Gorenstein) y sus colegas. La región cubierta, de seis millones de años luz de anchura, corresponde, a rasgos generales, a la región representada en la fotografía y el radiomapa de la página anterior. El área de máximo en la imagen de rayos X es producida por la galaxia NCG 1275.

Volvamos ahora al lugar de los cúmulos en el esquema de las cosas a mayor escala. ¿Termina la jerarquía de agrupamientos del universo con los cúmulos, o se extiende todavía a otra y otra y otra cada vez a nivel más alto? La defensa de la existencia de asociaciones físicas de cúmulos de galaxias en supercúmulos no es en modo alguno tan convincente como la de los cúmulos, pero parece ir mejorando. De Vaucouleurs ha argumentado que la distribución y orientación de las galaxias en una región de alrededor de 100 millones de años luz en torno al sistema local, indica la existencia de un supercúmulo local que incluye el grupo local, el cúmulo de Virgo y un número tan elevado como otros 100 grupos de galaxias. Ciertos análisis del catálogo de cúmulos de Abell han revelado otros ejemplos estadísticamente representativos de supercúmulos con diámetros de cientos de millones de años luz. Recientemente, las observaciones de rayos X han aportado indicios de la existencia de supercúmulos. Al analizar los datos del satélite *Uhuru*, los investigadores han identificado emisiones de rayos X procedentes de varias direcciones en el cielo, mostrando seis o más cúmulos ricos de galaxias. La interpretación más razonable de sus análisis parece ser la de que la emisión de rayos X proviene de un gas caliente y difuso en el que los cúmulos se encuentran inmersos. La masa en el gas caliente puede ser suficiente para mantener los cúmulos gravitatoriamente ligados en un sistema único, suministrando así una base física para la existencia de este paso siguiente en la jerarquía.

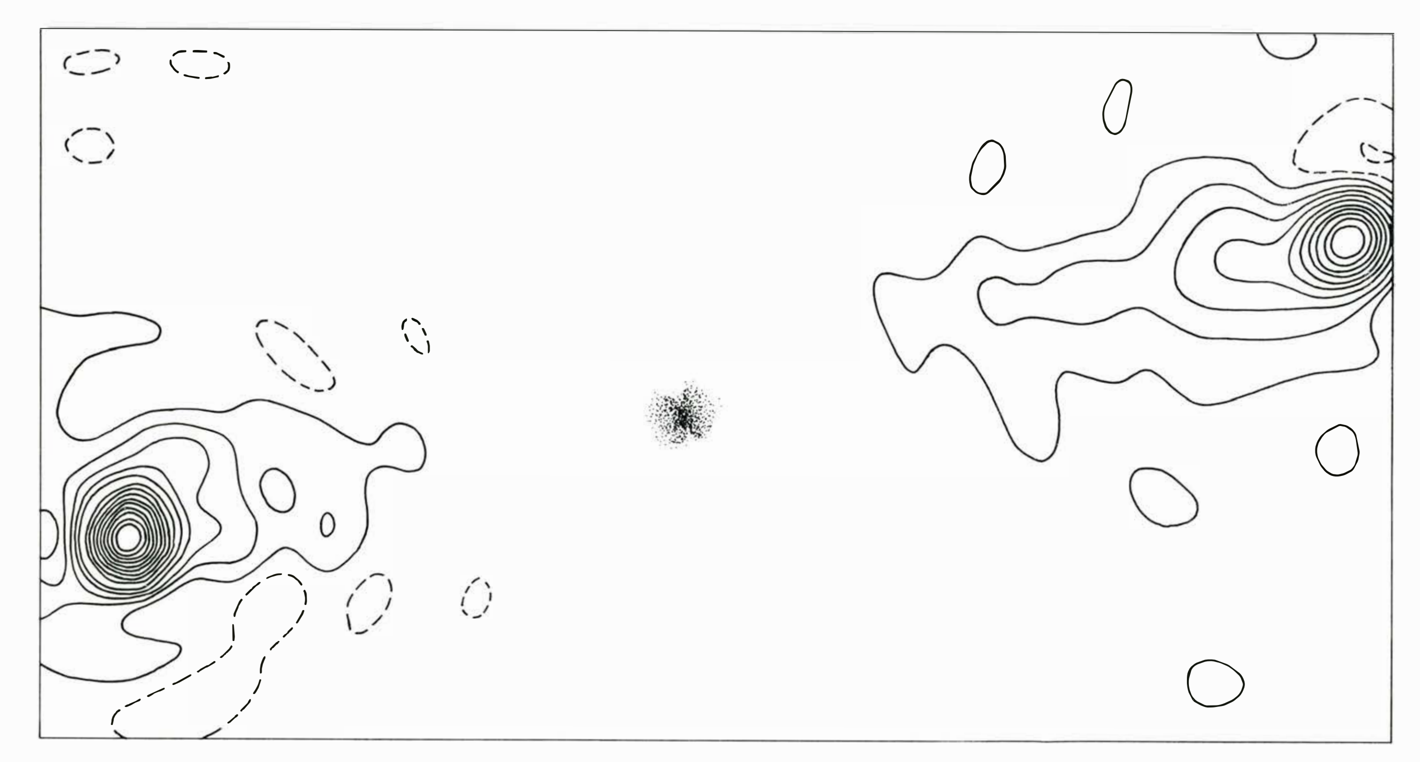
Por último, debemos mencionar el papel que representan los cúmulos de galaxias para determinar el sino final del universo. En gran medida, tal sino estará determinado por la cantidad de masa que el universo contiene. Si la concentración de masa es mayor que un cierto valor crítico, la expansión del universo que comenzó con la "gran explosión" inicial no continuará indefinidamente, sino que se irá retardando, cambiará de signo y el universo se colapsará. Un universo "cerrado" alternativo es aquel que experimente un ciclo sin fin de expansión, colapso y reexpansión. Por otra parte, si la concentración de masa es demasiado baja, el universo se expansionará por siempre; será "abierto". Las estimas actuales de concentración de materia en el universo indican que ésta se halla por debajo de la densidad crítica, siendo al menos diez veces menor, lo que implica que el universo se expansionará por siempre.

El estudio de los cúmulos de galaxias puede, sin embargo, haber suministrado un

nuevo indicio respecto a la masa del universo. Como hemos visto, varias líneas de argumentación basadas en recientes observaciones ópticas, de rayos X y de ondas de radio, indican que la masa de las galaxias en los cúmulos ricos es unas 10 veces mayor de lo que se había pensado. Si esto es verdad para las galaxias en general, y existen crecientes pruebas de que puede serlo, la concentración de masa en el universo representada por las galaxias es 10 veces superior a las estimas previas, y el universo puede después de todo ser cerrado. El problema del estado final del universo está todavía sometido a la duda, pero el lugar de los cúmulos de galaxias en la moderna astronomía no lo está. Han demostrado ser uno de los más importantes puestos de vigilancia desde los cuales uno puede aventurarse más allá de las presentes fronteras de la cosmología y la astrofísica de altas energías.



RADIOFUENTE MAS POTENTE que se conoce. Se trata de una galaxia elíptica gigante situada en el centro de un cúmulo rico en la constelación del Cisne. La fuente, designada Cygnus A, es la mancha vellosa que aparece ligeramente a la izquierda del centro de esta fotografía, hecha con el telescopio Hale de 5 metros. La curiosa forma de mariposa de la imagen de la galaxia se interpretó en un principio como correspondiente a dos galaxias en colisión, en la creencia de que sólo un tal cataclismo podía explicar la intensa radioemisión del objeto. Se considera hoy que la bifurcación en la imagen está producida por polvo, que puede realmente obscurecer gran parte de la totalidad de la galaxia porque el objeto no brilla tanto como muchas de las galaxias elípticas vecinas.



ESTE RADIOMAPA DE CYGNUS A revela que la radioemisión está concentrada en dos lóbulos que se extienden unos 500.000 años luz a cada lado de la galaxia. Las isolíneas del radiomapa sugieren que materia eléctricamente cargada se expulsa con violencia de la galaxia y se está moviendo hacia fuera a gran velocidad. Cygnus A es también una fuente de rayos X. El radiomapa se construyó en el Observatorio Radioastronómico Mullard, de Cambridge.

Los mecanismos del mecanizado por abrasión

Muchos mecanizados no se realizan por corte sino por abrasión. Con el fin de mejorar la eficiencia de este último proceso se investiga la forma física de trabajar de los granos abrasivos

Leonard E. Samuels

La mayoría de las veces resulta imposible construir, por simple moldeo o por forja, una pieza metálica acabada que tenga por destino ser componente de una máquina. La pieza necesita con frecuencia ulteriores acabados, que se efectúan a través de uno de los procesos que se encuadran en el amplio concepto de mecanizado. Podría pensarse que dicho acabado se realizara por refinadas herramientas de corte; y así ocurre en parte. Pero la parte del león se la llevan las técnicas tradicionales más toscas, de rectificado y pulido, que caben dentro de la descripción del mecanizado por abrasión.

Una ventaja del mecanizado por abrasión es que pueden trabajarse metales cuyo grado de dureza y tenacidad hace inútil el uso de herramientas de punta única. Los abrasivos comunes son mucho más duros que los metales más duros. La alúmina (óxido de aluminio), el carburo de silicio y el diamante, que se cuentan entre los abrasivos de mayor uso, se inscriben también dentro de las sustancias más duras. Otra ventaja del mecanizado por abrasión radica en su propia bondad, mejor que la mayoría del resto de procesos de mecanizado; produce piezas con mayor precisión dimensional y buen acabado superficial. El proceso es asimismo muy flexible: los abrasivos pueden emplearse de múltiples formas para objetivos diferentes.

Debido a esas ventajas, el mecanizado por abrasivos se ha convertido en un proceso industrial de primera línea. Las máquinas de rectificado y pulido constituyen el 25 por ciento, en dólares, de las transacciones comerciales anuales de máquinas de mecanizado en Estados Unidos. El proceso, en consecuencia, ha sido muy estudiado desde el punto de vista ingenieril. Pero apenas si se ha investigado lo que podríamos denominar el aspecto físico. Entiendo por éste el examen de la interacción entre las partículas abrasivas individuales y la superficie de la pieza que se está trabajando (parte a mecanizar), la consideración de las partículas abrasivas como herramientas individuales de corte y por último, los estudios que facilitan resultados para desarrollar un adecuado análisis matemático del proceso. Tal es la línea de trabajo que hemos venido siguiendo mis colegas y yo mismo en los Materials Research Laboratories del Departamento de Defensa australiano. En particular, debo reconocer la contribución del último colega en sumarse, Thomas Mulhearn, de quien son las ideas fundamentales de nuestro enfoque.

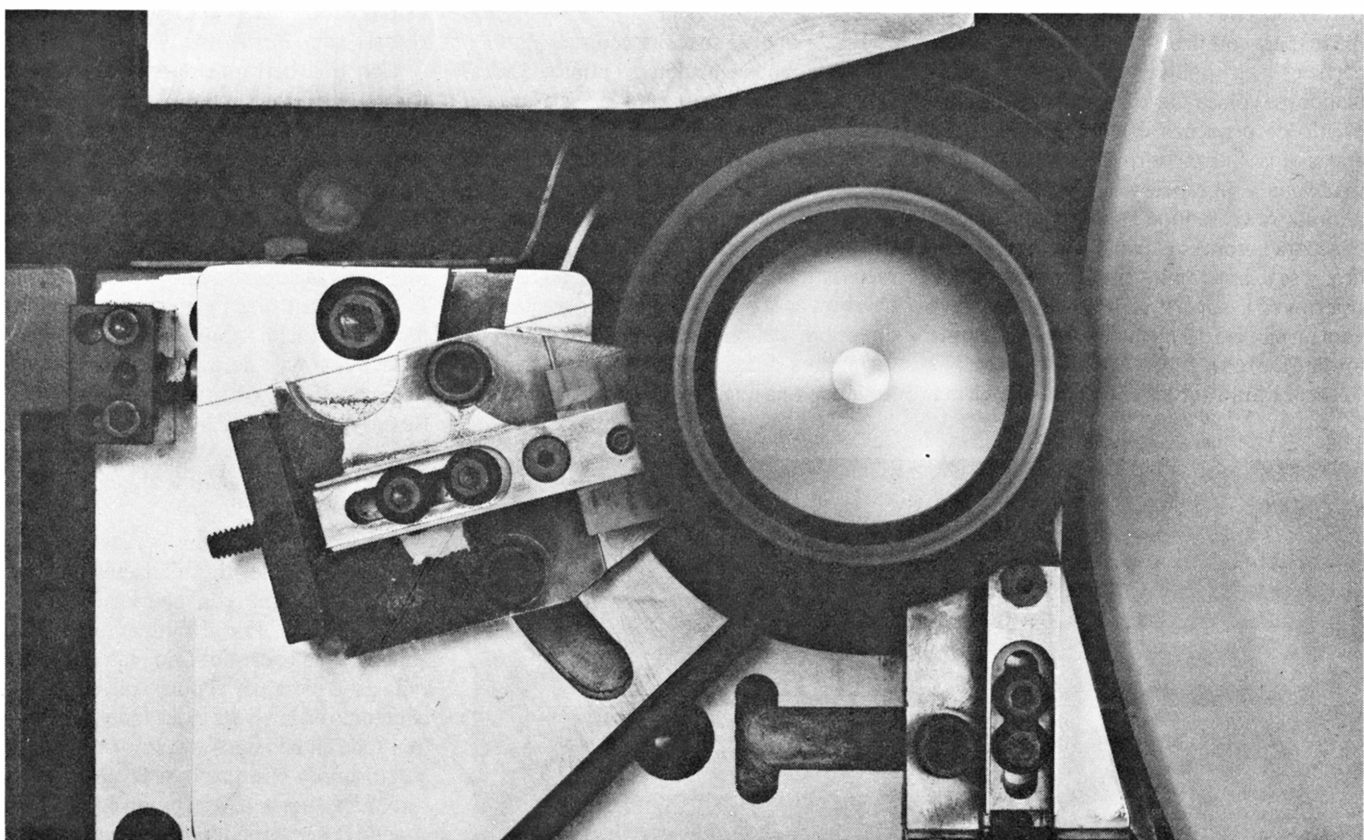
Cabría preguntarse a qué vienen esos estudios, aparte de satisfacer la curiosidad científica. Muchos procesos de mecanizado globales pueden analizarse de un modo favorable si nos fijamos en que el volumen de material arrancado de la pieza trabajada por la herramienta se desecha de aquélla. Rendimiento o eficiencia que alcanza el 100 por ciento, en cuanto a eliminación del material. El volumen arrancado puede calcularse con facilidad, incluso para procesos de mecanizado complejos, como es el caso del rectificado. Sin embargo, abundan pruebas indirectas que ponen de manifiesto que la eficiencia del mecanizado por abrasión no llega ni de lejos al 100 por ciento, en cuyo caso los cálculos tienen un valor limitado, a menos que la eficiencia pueda determinarse, cuando menos, de un modo aproximativo. Además, ello podría ayudar a conocer qué factores controlan la eficiencia de eliminación del material al objeto de optimizarlos por una vía racional.

Hay otros dos problemas importantes de orden práctico que deben considerarse: los puntos abrasivos se gastan con gran rapidez y la superficie de la pieza a mecanizar experimenta un calentamiento muy superior en el mecanizado por abrasión que en el mecanizado tradicional, de suerte que el efecto sobre la pieza cuando esté en servicio puede ser contraproducente. El mecanizado por abrasión no puede perfeccionarse en ningún aspecto de éstos (excepto por métodos de tanteo) mientras no se llegue a comprender los procesos que ocurren cuando se arrastra una partícula abrasiva a través de una superficie metálica.

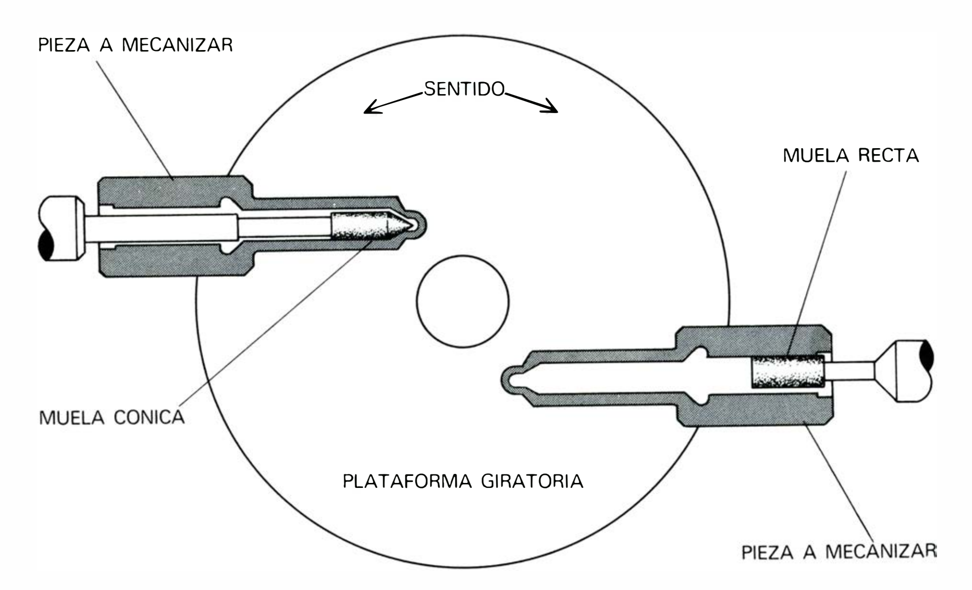
La dificultad radica en que se trata de un proceso de extrema complejidad, debido sobre todo a la forma irregular de las partículas de abrasión. En realidad, sólo una pequeña porción de la partícula corta el metal. Y es la forma de esa porción lo que en verdad importa, careciendo de mayor interés la forma y las dimensiones del resto de la partícula. Por supuesto, en la transmisión de las fuerzas al punto activo interviene toda la partícula; al igual que observamos en una herramienta de torno, en que no sólo debe haber un punto de corte sino también un buen soporte que lo afirme. Debe además surgir un nuevo punto activo en la masa de la partícula que sustituya al punto original que se haya roto quedando fuera de servicio. El diámetro de la partícula limita el número de las que pueden agruparse en un volumen dado; por consiguiente, el diámetro condiciona el número de puntos activos que pueden estar en contacto con una región determinada de la pieza. Estos detalles, sin embargo, son de importancia secundaria, por lo que podemos prescindir de ellos y concentrarnos en la forma del punto que ha de trabajar la pieza.

Por ser muy irregular la forma de un punto activo, la primera etapa que debemos recorrer al establecer un modelo de la acción del punto será la de buscar una forma sencilla que lo represente. La forma simplificada tiene que ser, al propio tiempo, adecuadamente real y lo suficientemente sencilla para posibilitar el análisis del proceso. Quizá la esfera constituya la primera elección más simple, y como tal la han adoptado algunos investigadores.

Pero ni mis colegas ni yo mismo creemos que la esfera pueda aceptarse como representación real para configurar un modelo. Hay experimentos que sugieren que los puntos esféricos nunca podrán arrancar



ZONA DE TRABAJO de una máquina de rectificado (*arriba*) y muela de rectificar (*abajo*). A la derecha de la zona de trabajo se advierte la muela abrasiva rectificando una pieza, que, en este caso, se trata de un alojamiento de un cojinete a bolas para tres modelos de coche fabricados por la General Motors Corporation. La muela abrasiva es de óxido de aluminio. La superficie metálica radialmente rayada es un soporte magnético que retiene y hace girar la pieza que se está trabajando; las estructuras metálicas próximas a la pieza en la parte izquierda y en la inferior derecha sirven para centrarla. El tubo obscuro que asoma en la parte inferior izquierda suministra, durante el rectificado, un líquido refrigerante. En la fotografía inferior, la muela de rectificado y la pieza a mecanizar se hallan en movimiento en una operación de rectificado simulada. (En una operación de rectificado real, la zona de trabajo estaría cubierta por protectores de seguridad que la velarían.) A fin de obtener una fotografía más clara se detuvo la refrigeración. La máquina es una rectificadora de exteriores fabricada por la Bryant Grinder Corporation for the New Departure-Hyatt Bearings Division, de la General Motors Corporation. También para mayor claridad se han retirado un brazo de carga y una abrazadera.



OPERACION DE RECTIFICADO en el interior de un cuerpo de tobera, representada esquemáticamente. La máquina trabaja simultáneamente dos piezas. En una operación (*derecha*), una muela cilíndrica de rectificar remata un taladro realizado en la pieza. En la otra operación (*izquierda*), una muela cónica de rectificar roza las paredes del taladro rectificando un asiento cónico para una válvula de tobera. Ambas muelas se retiran al acabar su función; la plataforma de trabajo gira 180 grados, de suerte que la pieza terminada (la pieza de la derecha) se traslada al exterior y la pieza que necesita todavía el rectificado cilíndrico se coloca en la posición adecuada. Un brazo cargador recoge la pieza lista e introduce otra sin trabajar en el lado izquierdo de la plataforma.

material formando virutas en tiras, mientras que sí está demostrado que todas las formas de mecanizado por abrasión arrancan ristras de ellas. Basta un simple experimento para comprobarlo. Prepárese una superficie bien pulimentada de un metal blando; se coloca luego contra un papel salpicado de pequeñas esferas de cristal. Se aplica una fuerza normal al sistema formado por la superficie y el papel, y se mueve la muestra en sentido lateral. Con cuidado se separa entonces el papel y la pieza metálica, y se examinan los finales de los surcos abiertos en la superficie del metal. Se observará un pandeo del metal (que recibe el nombre de proa) en la cabecera de cada surco. No se encontrarán surcos al final de una viruta de mecanizado. Aquel modelo que no incorpore ese rasgo fundamental del mecanizado por abrasión (la formación de virutas) nos parecerá de escaso valor.

En el rango de sencillez ocupa el segundo puesto la representación del punto de abrasión mediante una pirámide. Se trata del modelo que, con mis colegas, he venido investigando. Comenzamos con el caso más simple: aquel en que la pirámide se mueve en una dirección perpendicular a una de sus caras. La pirámide está definida por dos características. La primera es el ángulo de abertura de la pirámide que se proyecta en la dirección del movimiento (ángulo que forma una de las caras laterales de la pirámide con una línea vertical que pase a través de su vértice). Este ángulo determina, junto con la profundidad y longitud de corte, el volumen de material que el punto arrancará cuando surque la pieza.

La segunda característica es el ángulo de inclinación entre la cara de avance de la pirámide y la superficie de la pieza a mecanizar. Este ángulo determina si el volumen arrancado de la superficie de la pieza se elimina realmente. En otras palabras, se trata de un factor fundamental de la eficiencia con el cual el abrasivo elimina el material de la pieza.

La pirámide se asemeja a una herramienta que tiene la punta en forma de *V* y que se emplea en operaciones ordinarias de mecanizado, como en los cepillados. El ángulo de inclinación de la cara de trabajo puede describirse, por tanto, en términos normalizados en la práctica de mecanizado: ángulo de incidencia (formado por la cara posterior de la pirámide y la superficie de la pieza) y ángulo de inclinación (entre la cara de avance de la pirámide y una línea vertical). El ángulo de incidencia no tiene un significado fundamental, con la salvedad de que sea siempre mayor que cero. Sí encierra, por contra, gran significación el ángulo de inclinación. Adviértase que, por convención generalizada, puede ser positivo o negativo [*véase la ilustración de la pág. 70*].

Con una herramienta con la punta en forma de *V* podemos llevar a cabo un experimento que simule un punto piramidal abrasivo. Se coloca el punto piramidal, hecho de un material duro (mucho más que la pieza a mecanizar, pero cuya dureza no le permita romperla fácilmente), de suerte que pueda incidir en la superficie de la pieza una profundidad controlada y pueda así variarse el ángulo de inclinación. Luego, el punto se mueve a través de la pieza una distancia dada con un ángulo de inclinación prefijado. Se retira el punto piramidal y se procede al examen del surco abierto. Vuelve a repetirse el experimento a distintos ángulos de inclinación.

Los surcos producidos por las pirámides que tienen ángulos de inclinación positivos terminan siempre con una viruta larga a modo de cinta. Por el momento podemos suponer que la cantidad de material arrancada de la pieza por el punto piramidal está contenido en la viruta y que todo el material (por todo entendemos el volumen entero del surco) queda eliminado si la viruta se ha roto. La viruta se halla a punto de romperse cuando la herramienta alcanza la arista de la pieza; probablemente ocurrirá que se rompa mucho antes. En ese caso, como una primera aproximación, la eficiencia de la eliminación de material es del 100 por ciento. Podremos afirmar entonces que el punto piramidal actúa de un modo cortante.

Los surcos abiertos por puntos piramida-

CUERPO DE TOBERA, en sección, acabado interiormente mediante las operaciones de rectificado que aparecen arriba. El cuerpo de tobera se emplea en los equipos de inyección de combustible por automoción.

les con ángulos de inclinación suficientemente negativos terminan en proas. Se forman crestas a ambos lados del surco, de suerte que el tamaño de la proa se mantiene constante, con independencia de la longitud recorrida por el punto. En este caso, el volumen de material arrancado de la pieza por el punto piramidal se encuentra en la proa y en las crestas. El punto opera aquí a modo de labrado, y la eficiencia de eliminación de material es nula, a no ser que se rompan las crestas o la proa.

Cuando el punto actúa de un modo cortante, el material se mueve continuamente hacia arriba, por encima de la cara de incidencia de la herramienta, arrancando una cinta de material superficial. Cuando el punto actúa en labrado, el material se desplaza, primero, hacia arriba, por delante de la cara de incidencia; luego, en torno a esa cara hacia las crestas laterales, de un modo parecido a como se comporta la onda arqueada que forma la proa del barco. Característica importante de este proceso es que el material se mueve simplemente en la superficie, pero no se desprende de ella. Sólo puede arrancarse a través de otros procesos secundarios: que se rompa la proa, que sea arrastrada fuera de la pieza o que se rompan las crestas. Todas estas posibilidades se dan en la práctica, pero la eficiencia en cuanto a eliminación de material es, en el mejor de los casos, baja.

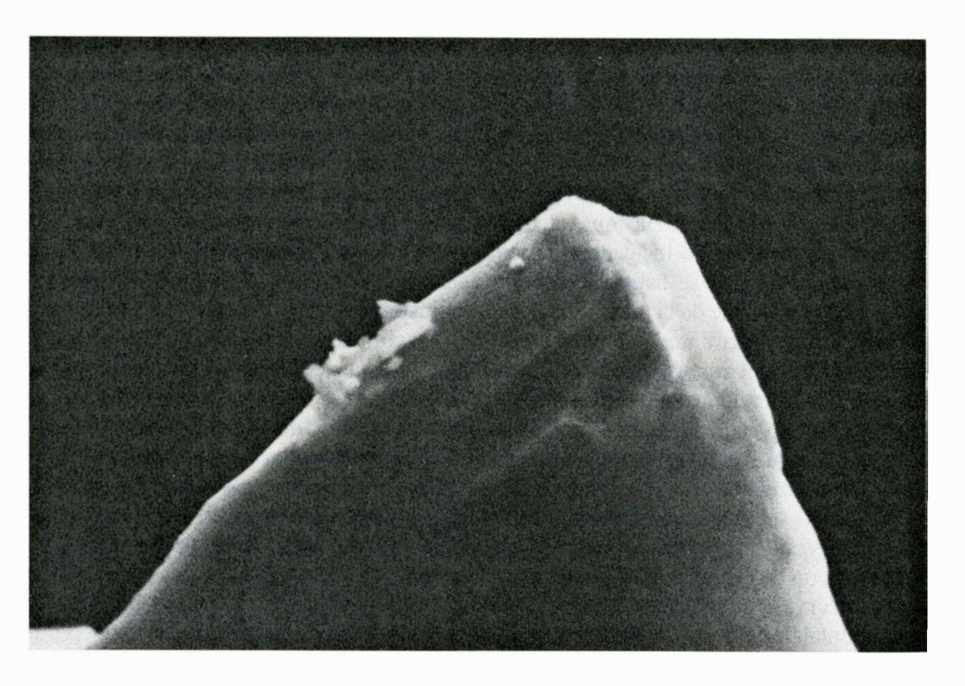
La transición del modo cortante, o corte, al labrado en estos experimentos simuladores cubre una gama de ángulos de inclinación muy reducida para la mayoría de los metales. No obstante, se puede definir un ángulo de inclinación crítico para cada metal; podemos suponer, además, que los puntos con ángulos de inclinación más positivos que el valor crítico cortan una viruta, en tanto que los puntos con ángulos de inclinación más negativos que el valor crítico labran simplemente un surco.

El carácter real de este modelo puede comprobarse, en primer lugar, con lo que constituye quizás el proceso más simple de mecanizado por abrasión: aquél en que una pieza se mueve unidireccionalmente a través de la superficie del papel abrasivo. Tal papel se prepara cementando una capa delgada de partículas abrasivas en un papel de relleno; las partículas suelen depositarse de suerte tal que su eje largo se disponga perpendicular, o casi, al plano del papel. Por tanto, la pieza a mecanizar se hallará en contacto con una punta aguda de la mayoría de las partículas. Obviamente, esta situación resulta favorable.

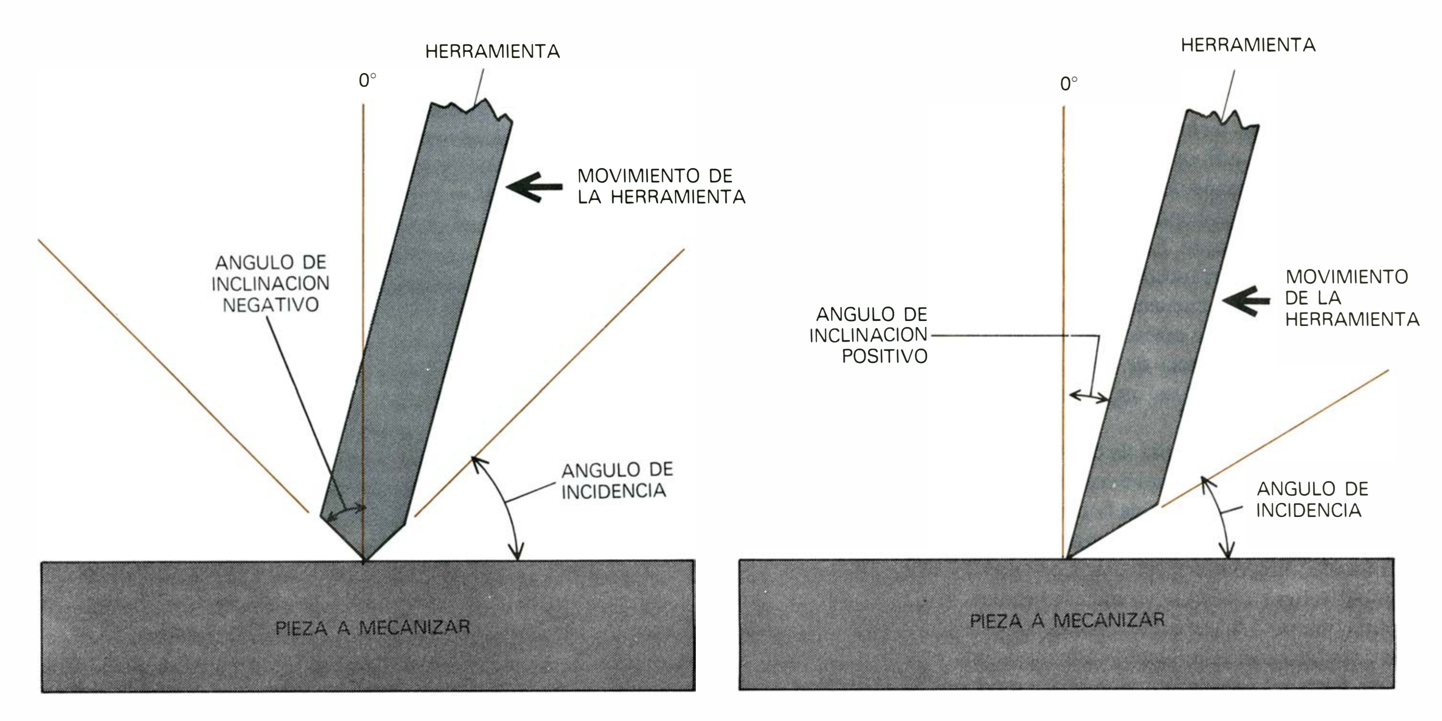
Podemos llevar a cabo ahora, con papel abrasivo auténtico, el experimento descrito antes para papel simulado con partículas esféricas. Las virutas y las proas producidas en la pieza mediante puntos con una amplia gama de ángulos de inclinación se parecen



PAPEL ABRASIVO, fotografiado de perfil, en el microscopio electrónico de barrido. El papel tiene una capa de partículas abrasivas, que aparecen aquí aumentadas 300 veces. En una operación abrasiva, muy pocas de tales partículas chocan con la superficie de la pieza en un momento dado; éstas rozan la pieza por la punta extrema.



PARTICULA ABRASIVA de carburo de silicio observada al microscopio electrónico de barrido, con 250 aumentos. El autor y sus colegas estudian la abrasión mediante el anclaje de una de estas partículas en un disco; el sistema disco-partícula opera de un modo parecido a una muela de rectificar; luego se examinan los trozos de metal eliminados de la superficie de la pieza trabajada. En esa operación, el ángulo de inclinación de la partícula resulta de capital importancia. Si imaginamos que la pieza se mueve de izquierda a derecha, en sentido contrario a la partícula, se define el ángulo de inclinación entre la cara izquierda del vértice que observamos fotografiado y una línea vertical que lo cortara. Normalmente se desechan virutas en forma de cintas cuando el ángulo de inclinación, para un metal dado, es más positivo que un valor crítico, y se eliminan otras, más pequeñas, en forma de gotas (llamadas "proas") cuando el ángulo de inclinación tiene un valor más negativo que el valor crítico.



ANGULOS DE INCLINACION positivos y negativos, formados por herramientas de corte unipuntuales, que son las que, en principio, se parecen más que cualesquiera otras a las partículas abrasivas. Si la pieza a mecanizar fuera de acero, el ángulo de inclinación crítico, es decir, el ángulo que constituye la línea divisoria de la eficiencia e ineficiencia en cuanto a eliminación de material, sería nulo (cero grados). Un punto cortante o un punto abrasivo con un ángulo de inclinación más positivo que el valor crítico arrancará una viruta, en tanto que un útil puntual con un ángulo de inclinación más negativo que el valor crítico labrará simplemente un surco. Para un metal determinado, el ángulo de inclinación crítico puede modificarse por el calor generado en la superficie y por los líquidos refrigerantes.

bastante a las virutas y las proas producidas por las herramientas del modelo con la punta en forma de *V*. Evidentemente, el modelo que represente un punto abrasivo a través de una pirámide tendrá cierto grado de verosimilitud.

De todo lo cual se deduce que la eficiencia en eliminación de material en un proceso de mecanizado por abrasión se determinará por la proporción de abrasivos que entren en contacto con la pieza a trabajar, que tengan un ángulo de incidencia apropiado para el corte de una viruta. Podemos validar esta implicación empleando de nuevo el proceso simple de abrasivo unidireccional en un papel salpicado de abrasivos. Hay que calcular primero los ángulos de incidencia de los puntos abrasivos que se hallarán en contacto con la superficie de la pieza. Se puede conseguir ello fotografiando el papel abrasivo, de perfil, en el microscopio electrónico de barrido, midiendo luego, sobre la micrografía, el ángulo de inclinación de las caras de los puntos que parecen estar en contacto con la pieza a mecanizar.

Tras múltiples mediciones, podemos trazar una curva de distribución de los ángulos de inclinación de los puntos abrasivos activos. La curva resultante es característica fundamental de cada tipo de abrasivo. Para un papel recubierto con abrasivo de carburo de silicio de 220 mallas, y utilizando acero como material a trabajar, se observa que alrededor del 25 por ciento de los puntos tienen un ángulo de incidencia más positivo que cero grados (el ángulo de incidencia crítico para el acero, según se ha determinado en un experimento simulado con herramientas con punta en forma de *V*). Así pues, cabe esperar que ese 25 por ciento aproximado de los puntos trabajen a modo de corte; el resto "labrarán". La eficiencia en cuanto a eliminación de material sería del orden del 25 por ciento.

Los resultados pueden confirmarse con el examen de varias terminaciones de surcos que se producen en los experimentos antes descritos y tras el cálculo de cuántos de ellos tienen una viruta asida. La coincidencia entre ambas estimaciones (examen y cálculo) siempre es buena. Además, estos principios pueden desarrollarse en un modelo matemático del proceso por abrasión. Las predicciones que se fundan en el modelo concuerdan perfectamente con los valores de abrasión que se obtienen en las operaciones de abrasión práctica.

La conclusión general a que llegamos es que la eficiencia de una clase de abrasión se determina a través de la relación entre virutas y puntos de corte abrasivos. La eficiencia puede mejorarse con abrasivos que posean un número más elevado de puntos penetrantes. Pero los puntos se rompen con facilidad a lo largo de su funcionamiento, siendo los más agudos los que antes sufren el desperfecto. De ahí que haya que llegar a una solución de compromiso en lo referente a la forma para obtener un resultado óptimo. Se puede mejorar el rendimiento de la abrasión si inclinamos todas las partículas abrasivas unidireccionalmente, si bien la ganancia en eficiencia de esa línea irá en detrimento de cualquier otra.

Un nuevo factor importante a considerar en la eficiencia de la abrasión es el valor del ángulo de inclinación crítico. Cuanto más negativo sea el ángulo, tanto mayor será la proporción de puntos que en un papel abrasivo corten virutas. El valor del ángulo crítico es característico del material de la pieza a trabajar, aunque hoy no podemos señalar todavía de una manera categórica qué propiedades fundamentales del material determinan el valor del ángulo crítico. Quizá sea lo más probable que venga condicionado, sobre todo, por fenómenos de fricción entre la viruta y la cara de incidencia del punto abrasivo. Pero la fricción es un asunto muy complejo dentro del proceso de la mecanización, y hasta el presente no ha podido analizarse ni siquiera para el caso más simple de una herramienta normal de mecanizado. De cualquier forma, síguese que la eficiencia en la eliminación del material es de esperar que varíe con los distintos metales de un modo tal que no tenga que relacionársele directamente con ninguna propiedad física sencilla de un metal particular.

La hipótesis de que los efectos friccionales están involucrados se apoya en que el ángulo de inclinación crítico se ve afectado por la presencia de un lubricante eficaz. Los líquidos se emplean con frecuencia en sistemas de mecanizado por abrasión y suele recurrirse a ellos como lubricantes. En muchos casos su cometido principalmente es refrigerante, pero en otros desempeñan un claro papel lubricante.

El tetracloruro de carbono constituye un ejemplo de genuino lubricante, por lo menos a bajas velocidades de corte. Aunque puede utilizarse (con cuidado) en experimentos de laboratorio, resulta demasiado

tóxico para emplearlo en la industria. Entre otras funciones, hace más negativo el ángulo de inclinación crítico. Por ejemplo, cambia el ángulo crítico para el acero desde cero grados hasta −20 grados. Aunque este efecto se haya ensayado sólo de una manera provisional, podría servir de medio para calibrar la eficacia de los lubricantes empleados en los mecanizados por abrasión industriales, en donde la lubricación es, hoy por hoy, un arte oculto.

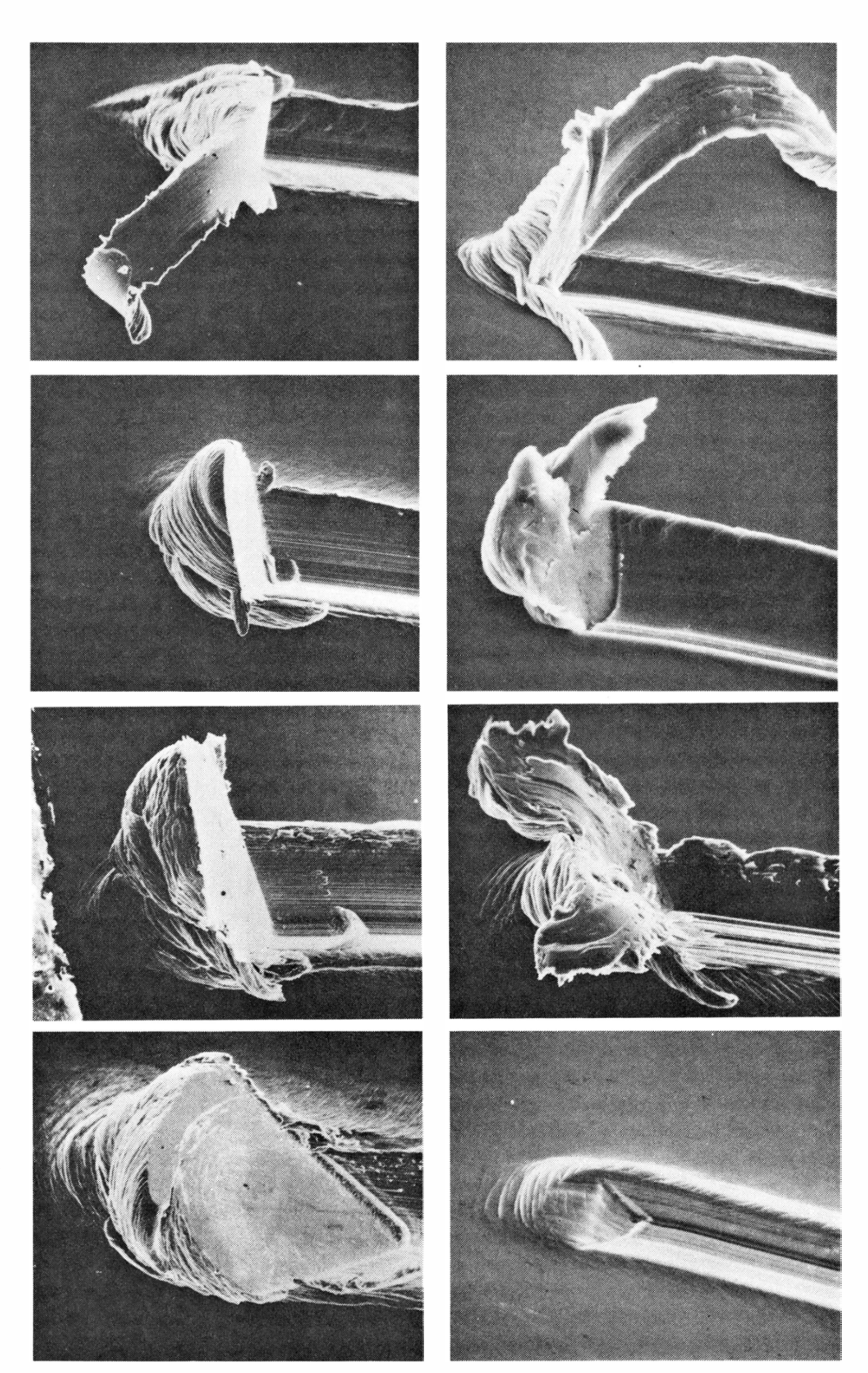
El ángulo crítico para el acero (no para otros metales) se ve afectado también por la temperatura de la capa superficial de la pieza. Así, el ángulo crítico del acero baja a −40 grados cuando se sobrepasan los 450 grados Celsius de temperatura. A ésa se llega, con facilidad, en las capas superficiales de una pieza de acero durante el rectificado industrial.

Y es probable que la forma en que los puntos abrasivos se proyectan perpendicularmente a la dirección del movimiento incida asimismo en el ángulo crítico de muchos metales. Así, el ángulo de inclinación crítico para el bronce ronda los −40 grados para una herramienta con la punta en forma de *V*, en tanto que un punto de forma rectangular tiene un valor mucho menos favorable: −10 grados. Algunas veces, la conformación de los puntos reales se encuentra entre la *V* puntual y el rectángulo.

Eigual cabe decir para los procesos simples de abrasión. El interés práctico real reside en el rectificado y, de una manera específica, en el rectificado del acero. La característica fundamental de una operación de rectificado consiste en hacer girar a alta velocidad un disco o muela hechos de partículas abrasivas unidas entre sí. La pieza a mecanizar se mueve por la superficie, normalmente cilíndrica, del disco. Los puntos abrasivos chocan con la pieza a una velocidad de unos 30 metros por segundo. La profundidad de la interacción entre un punto abrasivo y la pieza a trabajar es pequeña, de escasos micrometros. Los puntos chasquean, podríamos decir, la superficie de la pieza que trabajan.

Los fenómenos que ocurren cuando el abrasivo entra y sale de la pieza pudieran ser ahora importantes. No deberían despreciarse, como sí pasaba cuando la abrasión unidireccional. Una nueva diferencia de interés con respecto de la simple abrasión: las partículas abrasivas de una muela de rectificado se cementan juntas en una disposición al azar. La superficie de la muela se hechura, o mecaniza, de una manera periódica hasta la forma deseada con una herramienta de material duro, que suele ser el diamante. Este mecanizado provoca el desmenuzamiento de las partículas abrasivas. Y así resulta que los puntos abrasivos activos tienen en general menos cantos vivos que los puntos de un revestimiento abrasivo.

La distribución de los ángulos de inclinación de las partículas abrasivas en contacto con la superficie de la pieza a trabajar puede determinarse por los mismos métodos descritos para los revestimientos abrasivos. Los puntos suelen presentar ángulos más negativos que las partículas de un revestimiento abrasivo. Nuestro modelo sencillo podría predecir que, como máximo, sólo un bajo porcentaje de puntos abrasivos llegaría a actuar de modo cortante en el acero, con la exigencia de que el ángulo de inclinación, determinado en los experimentos simulados con herramientas con punta en forma de



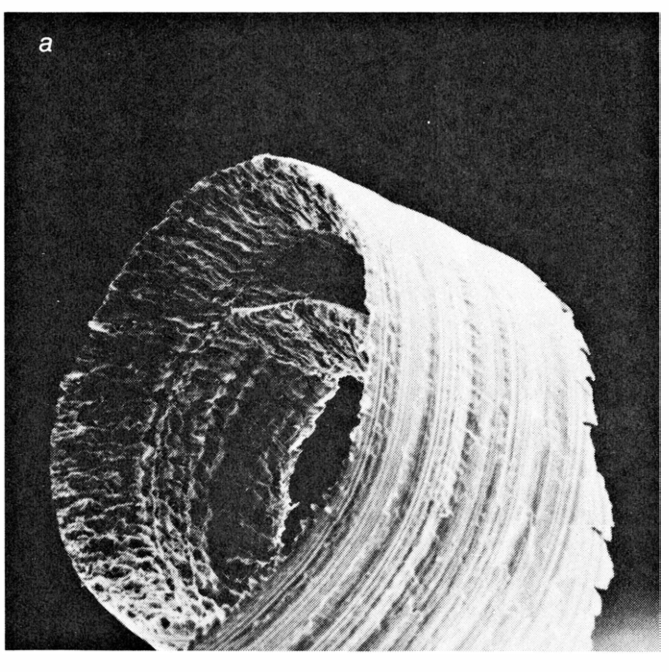
PARTICULAS ORIGINADAS EN EL MECANIZADO del aluminio. En las cuatro micrografías de la columna de la izquierda, se sometió el aluminio a mecanizado mediante herramienta con punta en forma de *V*, con ángulos de inclinación de 20, 0, −20 y −60 grados, respectivamente, a partir de la micrografía superior. Las herramientas con ángulo de inclinación (o desprendimiento) más positivos que el valor nulo cortaron una viruta; las herramientas con ángulo de inclinación negativos abrieron surcos. Las fotografías de la columna de la derecha corresponden al final de los surcos producidos por el papel de carburo de silicio al lijar una superficie de aluminio. Puede deducirse el ángulo de inclinación con que ha actuado cada partícula observando la huella del final de los surcos. Las virutas y las proas formadas son muy parecidas a las originadas por las herramientas con la punta en forma de *V*. Las micrografías de la izquierda se obtuvieron a 125 diámetros de aumento y, a 500, las de la derecha.

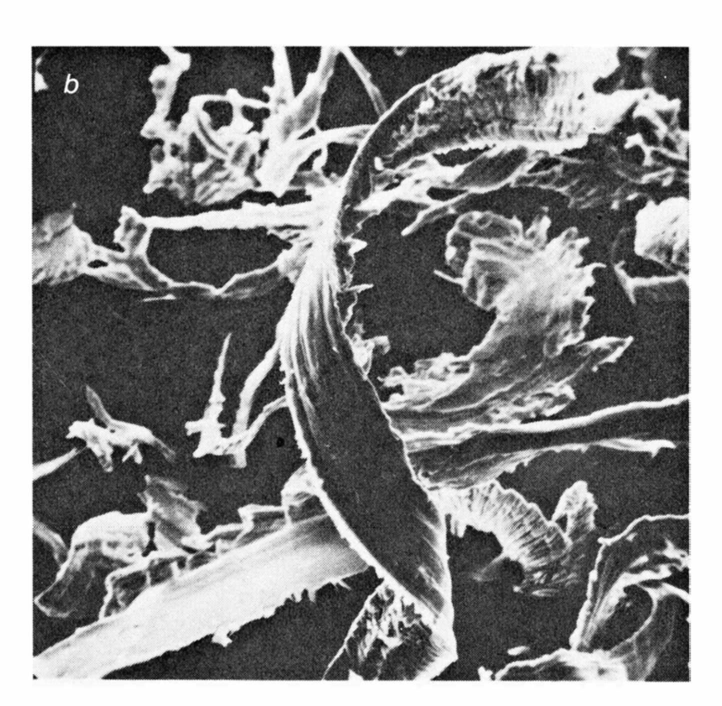
V, fuera realmente de cero grados. De ello se sigue que la eficiencia en eliminación de material sería de un valor pequeñísimo.

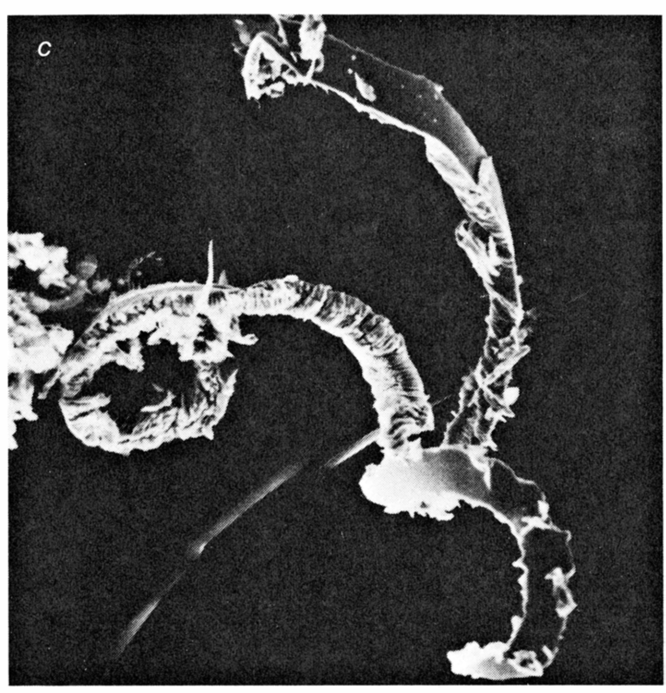
Sin embargo, como ya apunté, resulta muy difícil establecer un valor para el ángulo de inclinación crítico del acero, toda vez que dicho valor depende, de manera importante, de los lubricantes y de la temperatura que exista en las capas superficiales de la pieza. El valor puede verse modificado también por la velocidad que se registre en el rectificado, la menor profundidad de corte y las diferencias en la geometría de la interacción. Podría parecer que la idea global de ángulo crítico exige su validación bajo las condiciones que acontezcan en un rectificado real.

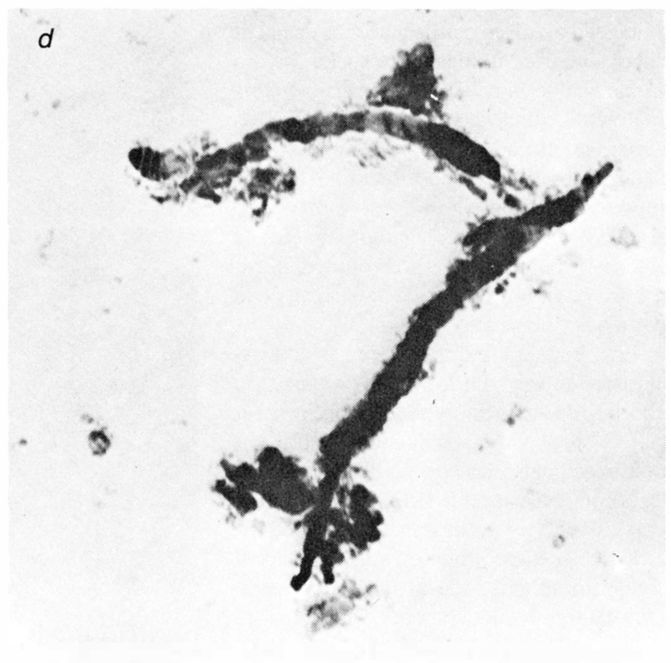
Hemos realizado experimentos de esta clase cementando una sola partícula abrasiva en la periferia de un disco metálico. Medimos el ángulo de inclinación de la partícula y preparamos discos en los que los puntos tuvieran una amplia gama de ángulos de inclinación. Rectificamos luego una pieza con un disco de éstos en las condiciones que son las habituales en los rectificados industriales. Recogimos por fin los fragmentos de material que se desecharon de la pieza que se trabajó.

Tales experimentos nos pusieron de manifiesto que las virutas en forma de cinta se producen sólo cuando los puntos abrasivos tienen ángulos de inclinación más positivos que un cierto valor, característico de la pieza a trabajar. Los ángulos determinados así son similares a los encontrados en los procesos simulados. Por ejemplo, es −45 grados para el bronce, valor que coincide con el obtenido en los experimentos simulados, y −10 grados para el acero, valor que es una pizca más negativo que en la simulación.









MATERIAL ARRANCADO de la superficie de la pieza a mecanizar. Su forma revela el mecanismo que se siguió para su obtención. Una viruta en forma de cinta (*a*), curvada, se produjo por torneado del acero. Una superficie de la cinta está casi lisa aunque con huellas longitudinales; se trata de la cara que estaba en contacto con la cara de inclinación de la herramienta cortante. La otra superficie presenta estrías regularmente espaciadas. Las partículas procedentes del rectificado (*b*) o del esmerilado (*c*) del acero ofrecen las mismas características, pero de menor tamaño y más irregulares. Las partículas obtenidas a través del pulido del cobre (*d*) son más pequeñas todavía, pero de indudable configuración en forma de cinta y parecen tener la estructura típica de una viruta del mecanizado. El rectificado, el esmerilado y el pulido son procesos del mecanizado por abrasión. Los aumentos de las microfotografías son, respectivamente, 90, 520, 472 y 70.800 diámetros.

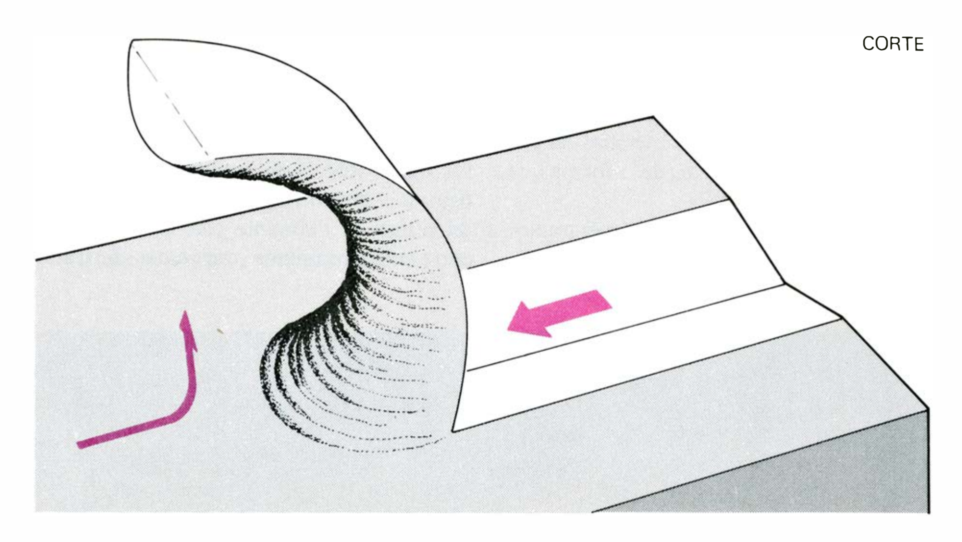
Este nuevo valor para el acero predice que un 10 por ciento, aproximadamente, de los puntos abrasivos de la muela de rectificado descrita pueden trabajar, de modo cortante, el acero.

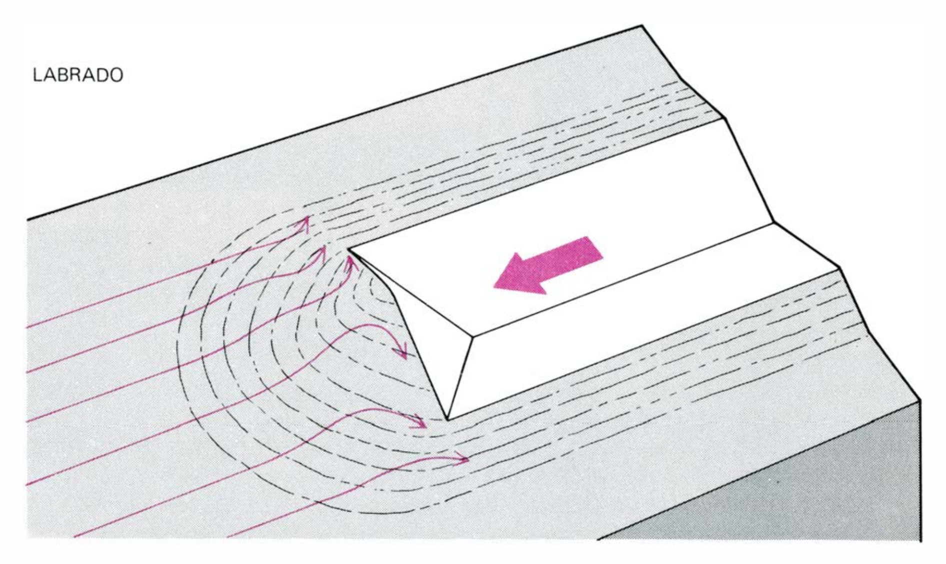
Un segundo resultado importante que hemos obtenido de los experimentos es el siguiente: se arrojan algunos fragmentos cuando el ángulo de inclinación es más negativo que el valor crítico. Se trata, empero, de pequeñas partículas, que pudieran ser proas, que han sufrido rotura donde el punto abrasivo abandonó la superficie de la pieza. Tanto en el acero como en el bronce, tales partículas se producen con un ángulo de inclinación inferior a los −7 grados. Este hallazgo significa que una gran proporción de puntos abrasivos en una muela de rectificar arrancan material, si bien a resultas de la formación de proas en el mecanizado por labrado. La eliminación de material a través de ese mecanismo, además de mostrar escasa eficiencia, consumiría mucha energía, pero se trata de un método de eliminación de material, aun cuando ningún punto opere de modo cortante. No es fácil analizar la eliminación por proas debido a la dificultad de predecir qué volumen de la proa se forma bajo determinadas circunstancias. En cualquier caso, sigue siendo manifiesta la ventaja de establecer las condiciones de rectificado de suerte que opere de modo cortante el mayor número posible de puntos abrasivos en la pieza.

Lo que nosotros necesitamos en realidad para dar validez a nuestro modelo es determinar, bajo condiciones reales de rectificado, qué proporción de puntos opera de modo cortante y qué cantidad lo hace a modo de labrado, tal como procedimos en el caso de la abrasión simple. Podríamos comparar entonces los datos con las previsiones deducidas por el modelo. Por desgracia, es punto menos que imposible acometer eso experimentalmente, pero estamos en el camino de conseguir ciertos enfoques prometedores.

Una de las cosas que pueden hacerse es recoger los trozos de material expulsados de la pieza por la muela de rectificado en una operación práctica de dicho proceso. Cuando se está rectificando el acero, estos desperdicios son siempre mezcla de cintas largas (virutas indudablemente) y pequeñas partículas (proas, probablemente). Necesitamos determinar la proporción de unas y otras para corroborar lo que dicte nuestro modelo.

No obstante, el modelo parece que sí puede aplicarse al rectificado, al menos en principio. Apunta el camino de delicados rasgos del rectificado que justifica estudios posteriores. Sugiere así que podrían estudiarse, con provecho, métodos de obtención de una distribución más favorable de los ángulos de incidencia en una muela abrasiva, al corregir el abrasivo o al mejorar en la práctica el hechurado de la muela. Podría resultar de interés también establecer la forma de mantener una distribución favorable de los ángulos de incidencia cuando el uso fracture los puntos abrasivos. Otro enfoque posible estribaría en determinar las condiciones que aseguren el valor más favorable posible para el ángulo de incidencia crítico. Este conocimiento podría mejorar no sólo la eficiencia del rectificado sino también el propio control del proceso, que, a veces, importa más.





CORTE Y LABRADO, esquematizados, según los haría una herramienta con la punta en forma de V. En el corte (*arriba*) se levanta una viruta de metal de la pieza que se está trabajando. El material se levanta de un modo continuo por encima de la cara de inclinación o desprendimiento de la herramienta. En el labrado (*abajo*), el material se levanta primero por delante de la cara de inclinación y luego oscila en su entorno formando crestas. El método de corte muestra gran eficiencia en la eliminación de material; si es que se consigue eliminar alguna brizna con el método de labrado, este proceso es ineficiente. Ambos métodos deben someterse a experimentos reales.

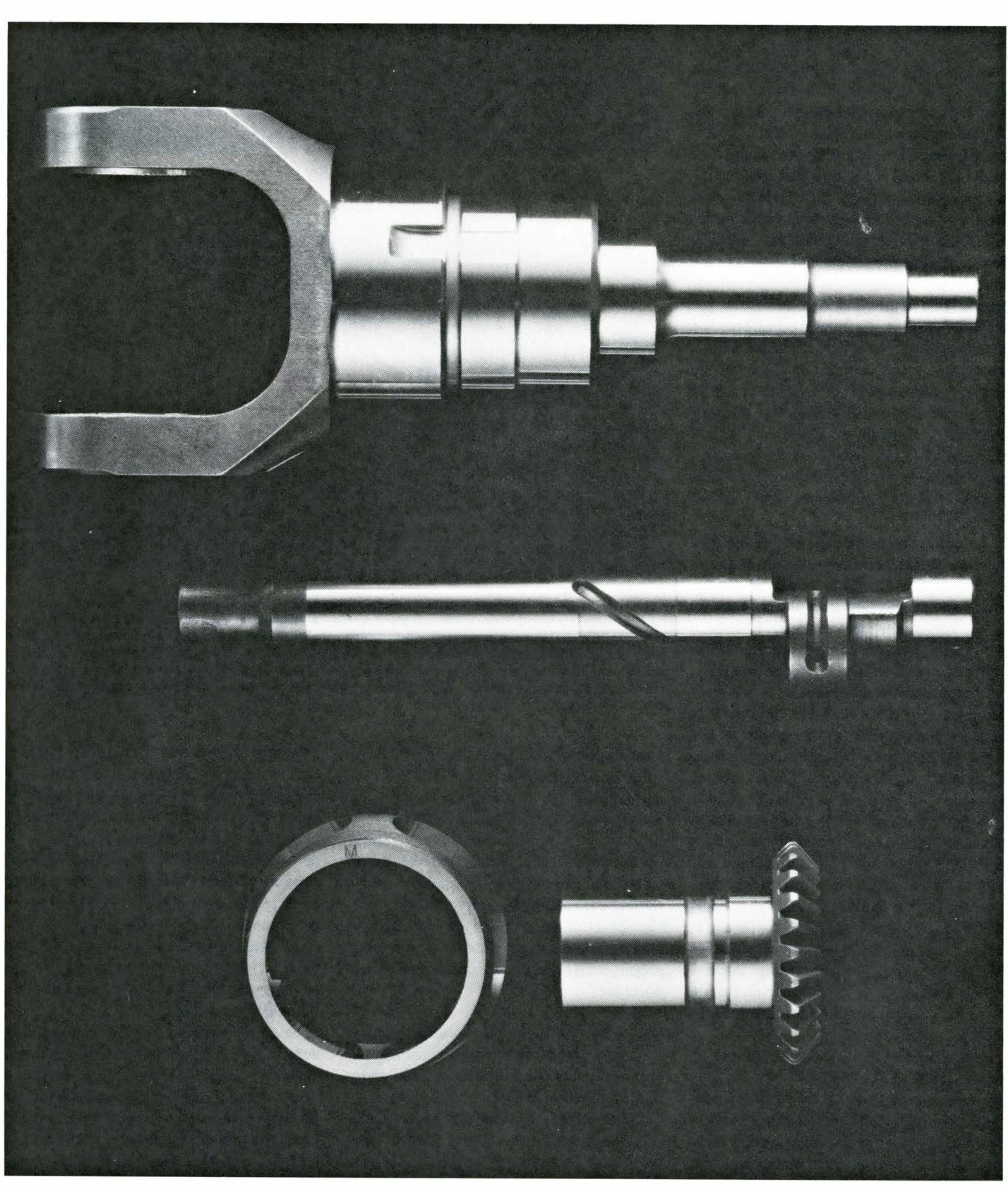
Podríamos decir que la abrasión ocupa el centro del espectro del mecanizado por abrasión y que el rectificado se halla en los acabados bastos. En los acabados finos se sitúan una serie de procesos que pueden denominarse pulidos mecánicos. Estos emplean partículas abrasivas de pequeño diámetro que no se encuentran cementadas entre sí, sino sostenidas holgadamente en un soporte blando. En un proceso típico, el polvo abrasivo se mezcla con un líquido para formar una pasta, que se aplica a un disco de paño sujeto a una muela rotatoria. La pieza a trabajar se coloca encima del paño bajo un ligero peso, y se les obliga a un movimiento de rotación mutuo. En otro proceso típico, muy común en el acabado industrial de metales, se mantiene el abrasivo mediante una cera blanda en la periferia de un disco rotatorio, que consta de capas de paño cosidas entre sí. El objetivo de todos los procesos no es otro que conseguir una superficie brillante como un espejo.

Se tiende a pensar en la superficie pulida como algo completamente distinto de otra acabada por esmerilado o rectificado. Pero no es verdad. Lord Rayleigh, quien desarrolló el efecto de la difracción de la luz, escribía hace muchos años que la única condición para que una superficie refleje la luz, como lo hace el espejo, es que la rugosidad de la superficie en cuestión sea pequeña comparada con la longitud de onda de la luz incidente.

Ese resultado puede lograrse de muchos modos. En mi opinión, uno de ellos es el corte fino. Creo, además, que es el mecanismo dominante para los métodos de pulido que emplean abrasivos de la forma que he descrito.

No caben ya dudas sobre el primer punto. En la actualidad se pueden producir superficies de elevada reflectividad con una geometría controlada con precisión mediante el torneado. Hay que tomar para ello ciertas precauciones: el torno debe ser rígido y operar a gran velocidad a un nivel de vibración bajo, y la herramienta de corte ha de tener un punto de diamante con las aristas de corte cuidadosamente preparadas. Se trata, pues, de un proceso de torneado, el cual elimina material por corte de virutas. Las precauciones sólo son necesarias para asegurar que las muescas del mecanizado sean tan someras y próximas entre sí que sólo puedan ser advertidas, con dificultad, por el mejor de los microscopios. Y tal es lo que ocurre.

Las superficies pulidas que producen la



VARIEDAD DE PIEZAS conformadas mediante rectificado. Arriba, una palanca de dirección de avión; en el centro, un cigüeñal de un compresor de refrigerador y, abajo, una caja de bolas para una junta universal que opera en la propulsión delantera de los coches (*izquierda*) y un engranaje biselado para aviones (*derecha*). La palanca, el cigüeñal y el engranaje se han rectificado mediante máquinas de la firma Cincinnati Milacron Inc. La palanca mide 21,6 centímetros de longitud.

acción de los abrasivos tienen surcos someros y poco espaciados, que sólo difieren en grado de los surcos producidos por el rectificado y la abrasión. Además, el material se desecha a una velocidad significativa; de nuevo la diferencia es sólo del orden de grados.

Hemos podido obtener pruebas de dos clases que demuestran que el material eliminado en el pulido resulta esencialmente del proceso de corte de virutas descrito para la abrasión y el rectificado. Primero, se puede examinar la terminación de los surcos producidos en la superficie de la pieza por una operación de pulido a través de la técnica expuesta para la abrasión. Muchos surcos terminan en una viruta, la cual difiere sólo en el tamaño de las virutas que se obtenían por abrasión (o por torneado).

En segundo lugar, las partículas que se recogen en un paño de pulir pueden extraerse y examinarse. El microscopio electrónico de transmisión revela que las partículas poseen muchas de las peculiaridades de las virutas de mecanizado del mismo metal. Una vez más, la diferencia que se aprecia entre pulido, por una parte, y rectificado y abrasión, por otra, es sólo de grados. La diferencia esencial, sugerimos nosotros, radica en que las partículas abrasivas se hallan soportadas de una manera característica en una operación de pulido, de suerte que sólo puede aplicarse un peso muy pequeño a cada una de ellas. Por consiguiente, el punto de cada partícula recorre una corta distancia de la superficie de la pieza, produciendo, además, un surco sumamente somero.

Puesto que la mayoría de las partículas están sostenidas de una manera holgada, es posible que algunas no actúen en una mezcla para pulir. Síguese de ello que la eficiencia de las operaciones de pulido puede mejorarse muchísimo si se da con una forma de sujetar con mayor firmeza las partículas abrasivas sobre la superficie de la pieza a trabajar en una actitud de corte, y se continúe manteniendo la escasa capacidad de hendir el surco cada una. En este sentido hemos obtenido cierto éxito con una muela de rectificar normal, en la que la profundidad de corte se mantenía dentro de un valor pequeño.

Nuestro modelo, que por necesidad de simplificación reduce la forma de un punto abrasivo a una pirámide, nos adentra bastante en la comprensión física de todo un espectro de procesos de mecanizado por abrasión. Nos parece que puede definir los factores más importantes y los que justifican el estudio posterior al objeto de mejorar la técnica de mecanizado. Mientras tanto, los procesos de mecanizado por abrasión siguen mostrándose altamente complejos y, ni siquiera desde una perspectiva a largo plazo, puede esperarse un pleno conocimiento de los mismos.

El sistema de recompensa del cerebro

Hace veinte años se descubrió que el cerebro tiene "centros de placer". Hoy se cree que estos centros pertenecen a un sistema de vías que influyen en el aprendizaje y la memoria

Aryeh Routtenberg

Los neurólogos han avanzado mucho en el conocimiento de la anatomía, fisiología y química del cerebro. ¿Tiene que ver ese conocimiento con el aprendizaje, el placer y la disposición de ánimo de los humanos? ¿Cabe que tales complejos procesos se regulen por vías cerebrales y sustancias químicas específicas? La respuesta parece ser afirmativa; y ello, fundamentalmente, merced al resultado de un intrincado y sorprendente descubrimiento que hicieron James Olds y Peter Milner, en la Universidad de McGill, 20 años atrás. Demostraron que una rata, a la que se le había introducido un electrodo en cierta área del cerebro, apretaba una palanca para autoestimularse. Olds, pionero en el estudio de la relación entre la función cerebral y el comportamiento, murió ahogado en 1976; su fallecimiento resultó trágico también para la ciencia, pues llevaba entre manos nuevas e interesantes exploraciones de la fisiología cerebral.

El fenómeno descubierto por Olds y Milner, conocido por "recompensa cerebral", puede localizarse en células nerviosas específicas y en sus fibras respectivas. El sistema de recompensa del cerebro se ve afectado por fármacos que interaccionen con las sustancias segregadas por tales neuronas. El hecho de que solamente ciertas vías de células y fibras nerviosas estén implicadas en la recompensa cerebral sugiere que dichas vías tienen una función específica. Ello guarda un paralelismo con lo que se sabe sobre el sistema visual y el sistema motor, cada uno de los cuales posee un grupo especifico de vías.

Olds fue quien, primero en la Universidad de California en Los Angeles y luego en la Universidad de Michigan, dio los pasos iniciales hacia la identificación de las vías responsables de la recompensa cerebral. Confirmó que el comportamiento de autoestimulación en los animales de laboratorio venía inducido sólo por la estimulación de determinadas áreas del cerebro y que no se trataba de un efecto general que obedeciera simplemente a la estimulación eléctrica del tejido cerebral.

Así, la estimulación del haz del prosencéfalo medio, grupo de fibras nerviosas que pasa a través del hipotálamo; da lugar a las más altas frecuencias de opresión de la palanca en respuesta a las corrientes eléctricas más bajas; las descargas de los electrodos en este área pueden producir unas respuestas de más de 100 pulsaciones por minuto. Hay otras áreas que se caracterizan por efectos más suaves; por ejemplo, la estimulación del área septal causó en los animales una respuesta de solamente 10 pulsaciones por minuto.

En 1962, trabajando a la sazón en el laboratorio de Olds, me sentí interesado por estas diferentes intensidades de respuesta a la estimulación por parte de distintas regiones del cerebro, y me dispuse a estudiarlas.

Daba a elegir, a la rata, entre dos palancas: una recompensaba por estimulación del cerebro y la otra suministraba el único alimento de que el animal podía disponer durante el experimento. Observé que el roedor renunciaba al alimento esencial para su supervivencia en aras de la estimulación cerebral. Pero manifestaba este comportamiento sólo si el electrodo estaba dentro del haz del prosencéfalo medio. Si el electrodo estaba ya a medio milímetro fuera de esa zona, o en otras áreas cuya estimulación inducía recompensa, el área septal por ejemplo, los animales apretaban ambas palancas, la que suministraba alimento y la que estimulaba el cerebro; de este modo podían mantener su peso corporal y sobrevivir.

Me intrigaba saber si poniendo a otro animal, más inteligente que la rata, en la misma tesitura mostraría el mismo comportamiento anormal, por desadaptado, o bien alcanzaría un equilibrio entre autoestimulación y alimentación en razón de su corteza cerebral más evolucionada. Eliot Gardner y yo mismo llegamos a comprobar la autoprivación de alimento en el mono rhesus, animal con la corteza mucho más desarrollada que la de la rata. Este poderoso efecto implica que los primates superiores, y hasta los propios seres humanos quizá, dejarían de comer con el fin de obtener una estimulación cerebral recompensante. Tales resultados sugieren que los mecanismos nerviosos que favorecen la autoestimulación ejercen una poderosa, si no dominante, influencia en el comportamiento, sobre todo en las actividades del momento. Puesto que el comportamiento es tan compulsivo, cabe preguntarse si el sistema de recompensa puede incidir en la habituación a las drogas. Así, hay pruebas de que ciertas regiones del cerebro, que son sensibles a la morfina y contienen una sustancia de acción parecida a la morfina, la encefalina, están en el mismo lugar que las regiones que mantienen la recompensa cerebral.

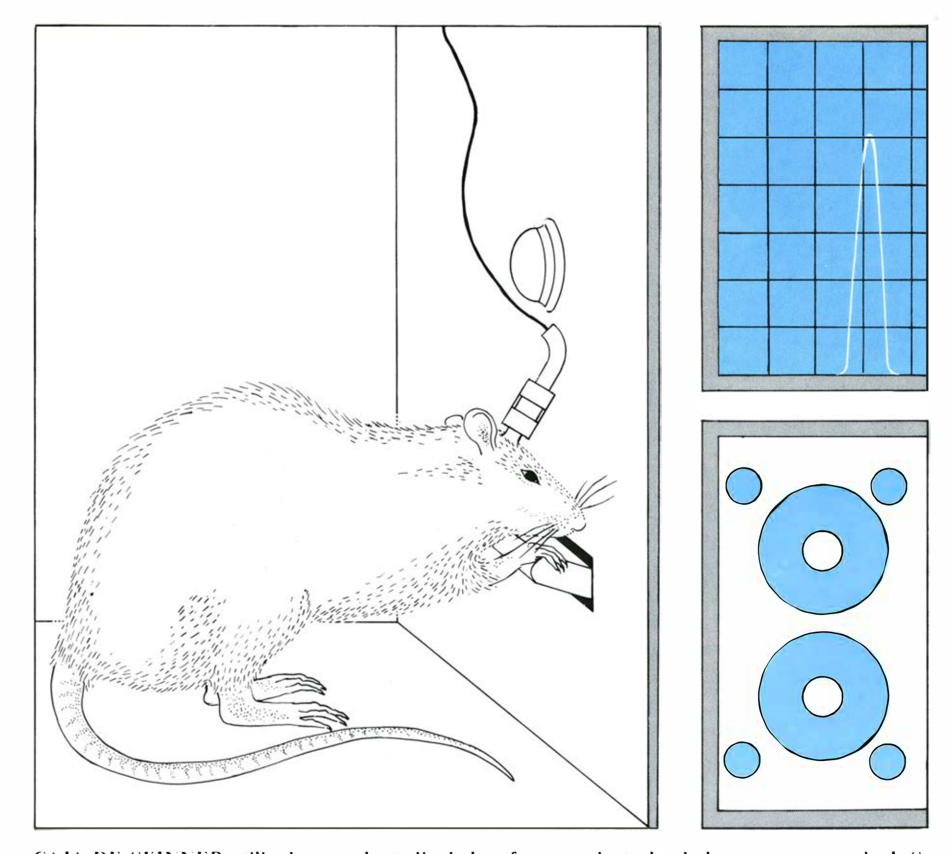
El funcionamiento del cerebro no se conoce con nitidez debido al conjunto, enormemente complejo, de células nerviosas y fibras correspondientes; de ahí que, para identificar las células implicadas en la autoestimulación, sea necesario combinar el estudio de la recompensa cerebral con el estudio de la anatomía del cerebro. En mi laboratorio de la Universidad Northwestern hemos venido trabajando en este campo produciendo lesiones con el electrodo esti-

DOS TIPOS DE FIBRAS NERVIOSAS en la corteza frontal del cerebro humano, en las micrografías fluorescentes de la página opuesta. Las imágenes fueron obtenidas tratando químicamente finas secciones del tejido cerebral de manera que las substancias transmisoras de las fibras nerviosas se volvieran fluorescentes al ser iluminadas con radiación ultravioleta. Esta técnica ha servido de herramienta esencial para conformar la topología de las fibras nerviosas que intervienen en la recompensa cerebral. La micrografía de la parte superior muestra una fibra nerviosa que contiene el neurotransmisor dopamina. La fibra de dopamina, de un color verde fluorescente, se distingue por su finura y sinuosidad, con prominencias en forma de huso irregularmente espaciadas. (Las brillantes burbujas amarillas del fondo no representan el neurotransmisor sino gránulos de un pigmento graso, la lipofuscina, que está presente en muchos tipos de células y se torna fluorescente en ausencia de tratamiento químico.) La micrografía de la parte inferior muestra una fibra nerviosa que posee el neurotransmisor norepinefrina. Esta fibra muestra también un resplandor verde, aunque puede distinguirse de la fibra de dopamina por sus prominencias situadas muy próximas entre sí, de extraordinaria fluorescencia. Tanto las vías de la dopamina como las de la norepinefrina de la corteza frontal se han relacionado con el sistema de recompensa del cerebro. Las micrografías, aumentadas unas 1000 veces, fueron tomadas por Brigitte Berger, del Laboratorio de Neuropatología del Hospital Pitié-Salpêtrière.

mulador bajo una ligera anestesia en los lugares del cerebro de ratas donde se había demostrado la autoestimulación. En cuestión de pocos días, empezaron a degenerar los elementos nerviosos próximos a la punta del electrodo estimulador. Impregnamos luego los animales con formaldehído, utilizando un colorante especial para los tejidos degenerados, al objeto de discernir cuáles eran los elementos nerviosos asociados con los efectos de la recompensa. Nuestro estudio de la corteza cerebral en el lóbulo frontal del cerebro proporciona un ejemplo de este intento de relacionar la autoestimulacion con vías específicas. Aunque se dudaba de que la corteza frontal influyera en la recompensa cerebral, se han encontrado dos regiones de ésta en la rata que dan cuenta de la autoestimulación. Provocamos lesiones en los lugares de autoestimulación de la corteza frontal, y trazamos una ruta a través del núcleo caudado y de la cápsula interna en su lado medio. A nivel del hipotálamo, esta vía se entremezclaba con el haz del prosencéfalo medio. Este estudio prueba que la recompensa cerebral en el haz del prosencéfalo medio resulta de la estimulación de estas fibras de la corteza frontal. Hay razones para pensar, basándonos en otras investigaciones, que tal sistema puede ser solamente uno de los varios sistemas de recompensa que atraviesan el haz del prosencéfalo medio.

Se ha demostrado la implicación de la corteza frontal en la recompensa cerebral, tanto en monos como en ratas. Edmund Rolls, de la Universidad de Oxford, ha descubierto puntos de autoestimulación en la corteza frontal del mono ardilla parecidos a las regiones descritas en la rata. Aun cuando los puntos del cerebro en donde se ha observado la autoestimulación son similares en un roedor (la rata) y en un primate (el mono ardilla), la gran diferencia, en lo que respecta al tamaño de la corteza frontal, que existe entre las distintas especies, da lugar a una amplia variación potencial en el significado de la estimulación de recompensa cerebral para una determinada especie.

La recompensa cerebral no sólo se puede encontrar en la corteza frontal y en el hipotálamo, sino también dentro del tronco cerebral: en el puente de Varolio y en la médula. Tales hallazgos indican que, aunque la recompensa cerebral únicamente ocurra en lugares específicos, se extiende desde el prosencéfalo al mesencéfalo y al metencéfalo. En 1969, Charles Malsbury y el autor demostraron que la autoestimulación podía obtenerse con electrodos situados en las vías de salida del cerebelo y en lugares del tegmentum pontino dorsal del tronco cerebral. Algunas de estas regiones también se hallaban próximas a las rutas recientemente descubiertas que estaban asociadas con los



CAJA DE SKINNER utilizada para el estudio de los efectos conductuales de la recompensa cerebral. Se implanta un electrodo de metal en el sistema de recompensa de la rata, y se deja que el animal desencadene un estímulo eléctrico en su cerebro mediante la opresión de la palanca. La curva de la pantalla del osciloscopio de la derecha indica la frecuencia de los estímulos. Si el electrodo estimulador se implanta en el haz del prosencéfalo medio del hipotálamo, la rata se autoestimulará casi sin parar durante días, olvidándose de comer, beber y dormir. Otras partes del sistema de recompensa cerebral dan lugar a efectos menos drásticos.

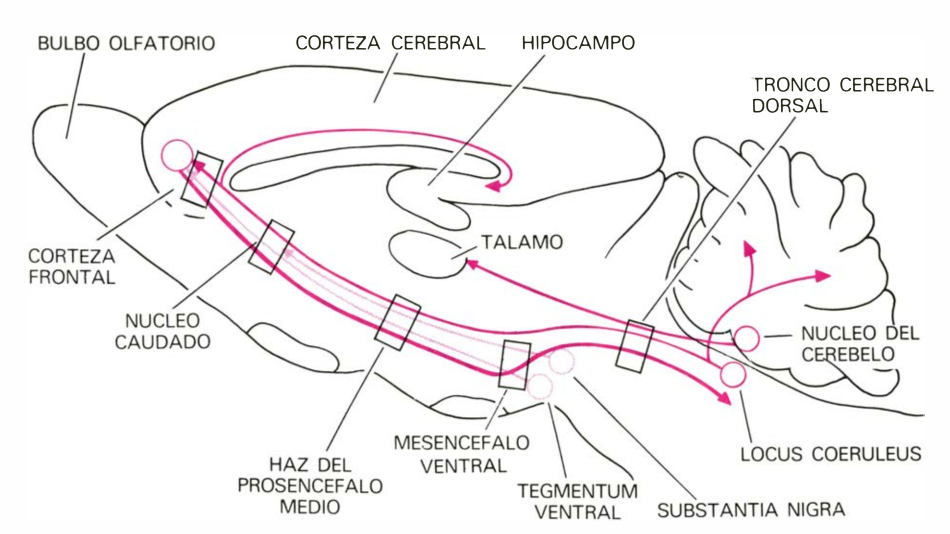
neurotransmisores de catecolaminas: sustancias que transmiten el impulso nervioso de una célula nerviosa a otra. Había motivos, pues, para sospechar que los neurotransmisores de este tipo tenían que ver con la autoestimulación.

En 1971, Urban Ungerstedt, del Instituto Karolinska de Estocolmo, describió nuevas vías de catecolamina en el prosencéfalo, el mesencéfalo y el metencéfalo. Trabajó con una técnica conocida como histofluorescencia, en la que la localización de sustancias especificas en un tejido se revela induciendo que éstas emitan una luz de un color característico. Dicha técnica fue desarrollada en 1962 por B. Falck, de la Universidad de Lund, y N.A. Hillarp, del Instituto Karolinska, quienes se basaron en un estudio anterior de O. Eränkö, de la Universidad de Helsinki, y Arvid Carlsson, de la Universidad de Göteborg. En 1974, Olle Lindvall y Anders Björklund, de la Universidad de Lund, aplicaron técnicas más sensibles para establecer la existencia, en el sistema nervioso central de los mamíferos, de varias vías asociadas con la catecolamina norepinefrina y varias rutas asociadas con otra catecolamina, la dopamina.

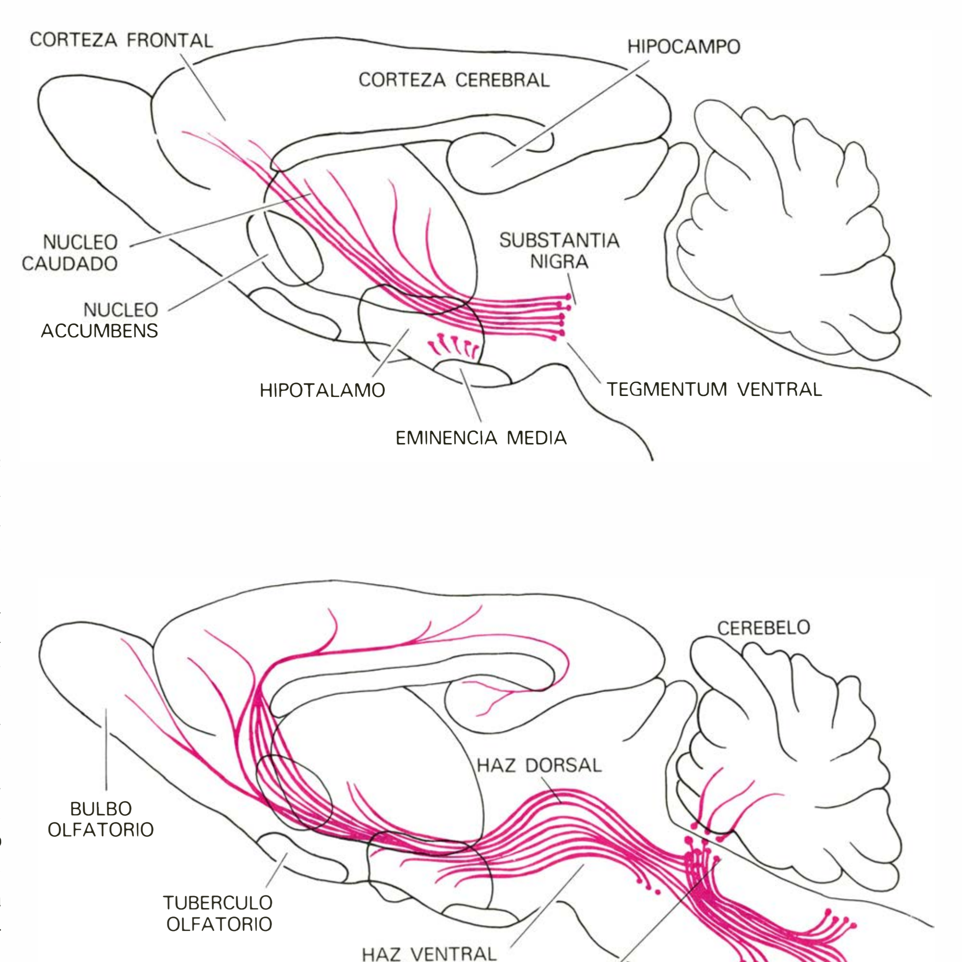
Para obtener las micrográficas histofluorescentes del tejido cerebral, se trató primero el tejido con aldehído o ácido glioxílico, que reacciona con las catecolaminas para formar fluoroforos, sustancias que se vuelven fluorescentes cuando son excitadas por la radiación ultravioleta. Al exponer una sección fina del tejido al ultravioleta en el microscopio de fluorescencia, el fluoroforo se excita y emite luz. Con la ayuda de un detector de longitud de onda especial puede observarse que la norepinefrina emite en la región del verde-amarillo del espectro, y la dopamina en la región del verde. Aunque resulta difícil determinar la diferencia de color sin un detector especial, la forma de la fibra nerviosa que contiene una sustancia u otra es diferente. Así, cuando se observan las fibras fluorescentes en una micrográfica histofluorescente, revelan la localización anatómica de la sustancia química. La técnica histofluorescente se funda, por tanto, en principios histoquímicos: es química en cuanto revela las rutas cerebrales por medio de una reacción química con los neurotransmisores, y es histológica porque la reacción tiene lugar en una fina sección de tejido cerebral en un portaobjetos de microscopio.

Se ha confirmado la existencia de las vías de la catecolamina mediante la aplicación de histofluorescencia al cerebro humano. Trabajando con tejidos de un feto inviable, Lars Olson, L.O. Boréus y Ake Seiger, del Instituto y Hospital Karolinska, han encontrado rutas cerebrales de catecolamina en humanos análogas a las que se habían observado en el cerebro de ratas y monos.

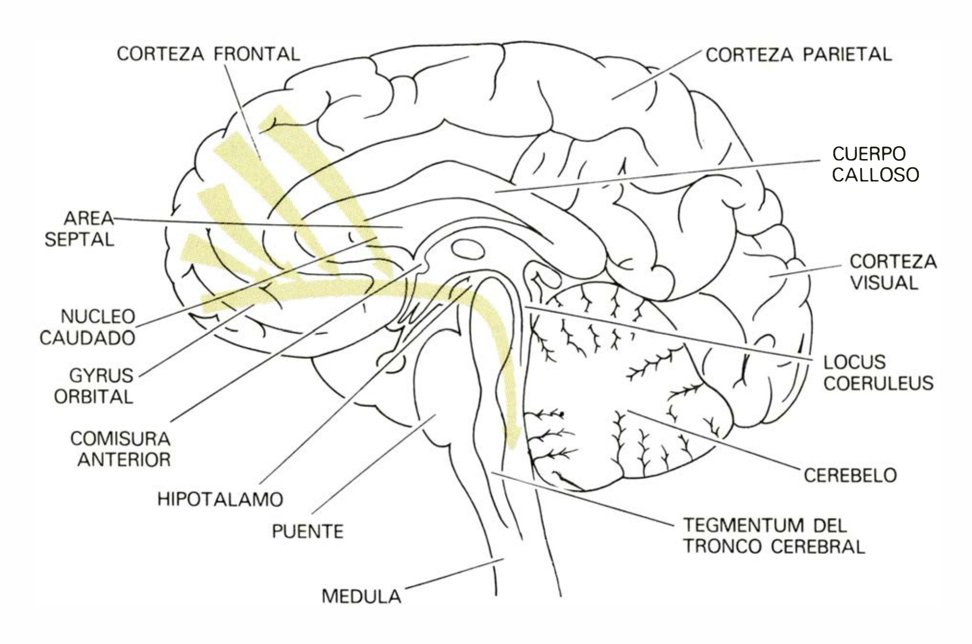
La prueba de una localización similar de



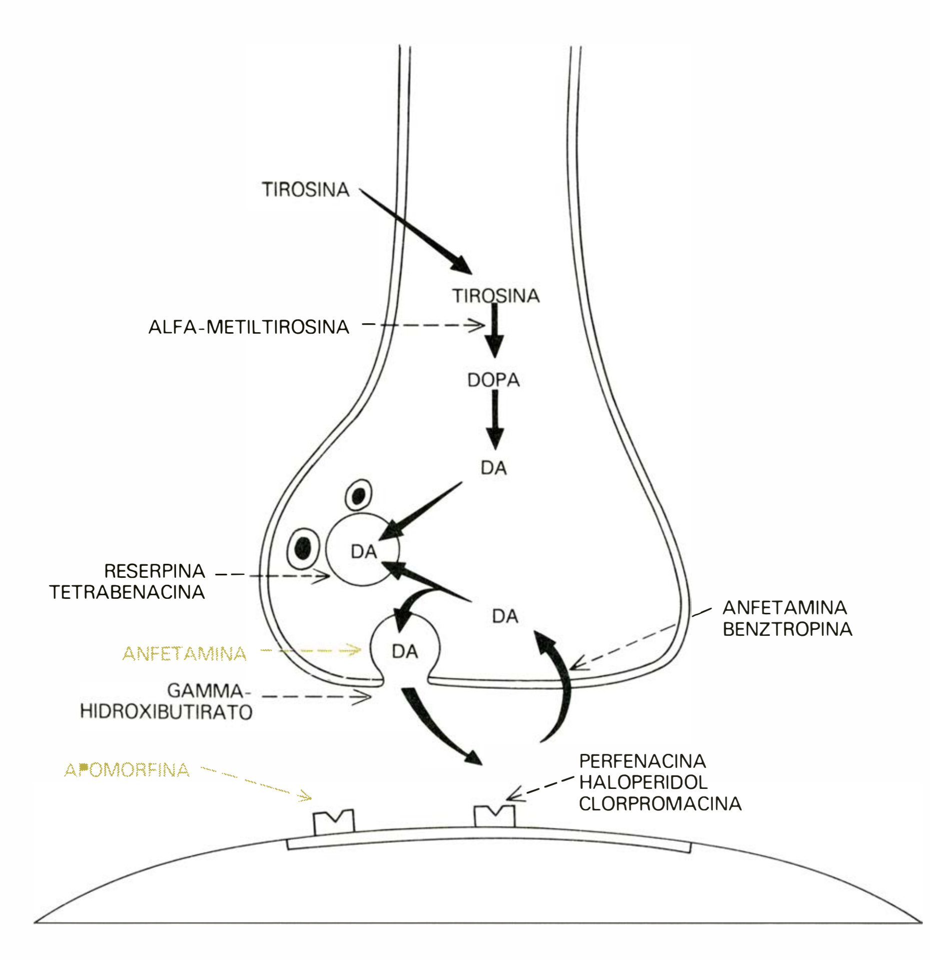
VIAS DE RECOMPENSA en el cerebro de la rata, esquemáticamente esbozadas en sección longitudinal. Las rutas se extienden en ambas direcciones, desde los cuerpos celulares nerviosos en el metencéfalo hasta el mesencéfalo y la corteza frontal, atravesando el haz del prosencéfalo medio en el hipotálamo. Los círculos indican las localizaciones de los cuerpos celulares; los rectángulos, las regiones donde se ha registrado un inequívoco comportamiento de autoestimulación en los estudios con la caja de Skinner (*página opuesta*).



VIAS NEUROTRANSMISORAS implicadas en el sistema de recompensa del cerebro de rata. Con ayuda de la microcopía fluorescente pudo configurarse su topología. Las células nerviosas que segregan dopamina (*arriba*) tienen sus cuerpos celulares concentrados en la substantia nigra y en el tegmentum ventral del mesencéfalo; los axones se proyectan principalmente en el núcleo caudado, la corteza frontal y la corteza entorhinal. Las células nerviosas que segregan norepinefrina (*abajo*) tienen sus cuerpos celulares localizados, sobre todo, en el locus coeruleus del tronco cerebral; estas neuronas se proyectan en el cerebelo, corteza cerebral e hipotálamo. Ambos sistemas, el de la norepinefrina y el de la dopamina, cubren gran parte del área que origina el comportamiento de autoestimulación en ratas. Las fibras de dopamina se encuentran sólo en áreas que afectan a la recompensa cerebral, mientras que las fibras de norepinefrina se extienden a otras regiones. Esta y otras pruebas abogan por un papel más determinante para la dopamina en la recompensa.



SISTEMA DE RECOMPENSA del cerebro humano. Se halla localizado, a grandes rasgos, en las regiones mostradas en color. Estas áreas corresponden a las partes del cerebro de rata que se responsabilizan del comportamiento de autoestimulación. Como en el cerebro del roedor, las vías se extienden entre el metencéfalo y la corteza frontal. La recompensa cerebral se localiza, pues, en neuronas específicas y en sus fibras.



TRANSMISION DE LA DOPAMINA a través de la sinapsis, corto espacio que media entre la parte terminal de una célula y la superficie de otra; dicha transmisión puede verse facilitada o inhibida por medicamentos psicótropos. Por tanto, los efectos de estos fármacos en el comportamiento de autoestimulación aportan cierta luz sobre los mecanismos neuroquímicos en los que se funda la recompensa cerebral. Los medicamentos inhibidores se muestran en negro, los facilitadores en color. La transmisión de la dopamina puede inhibirse por agentes que bloqueen su síntesis (alfa-metiltirosina), que eviten su almacenamiento en las vesículas (reserpina, tetrabenacina), eviten su liberación (gamma-hidroxibutirato) o bien porque se bloquee su enlace con los lugares del receptor en la membrana postsináptica (perfenacina, haloperidol, clorpromacina). La transmisión de la dopamina se encuentra facilitada por medicamentos que incrementan su liberación (anfetamina, cocaína), que facilitan la activación del receptor (apomorfina) o que inhiben (es decir, impiden) que la dopamina se vuelva a captar en la célula terminal desde la sinapsis (anfetamina, benztropina).

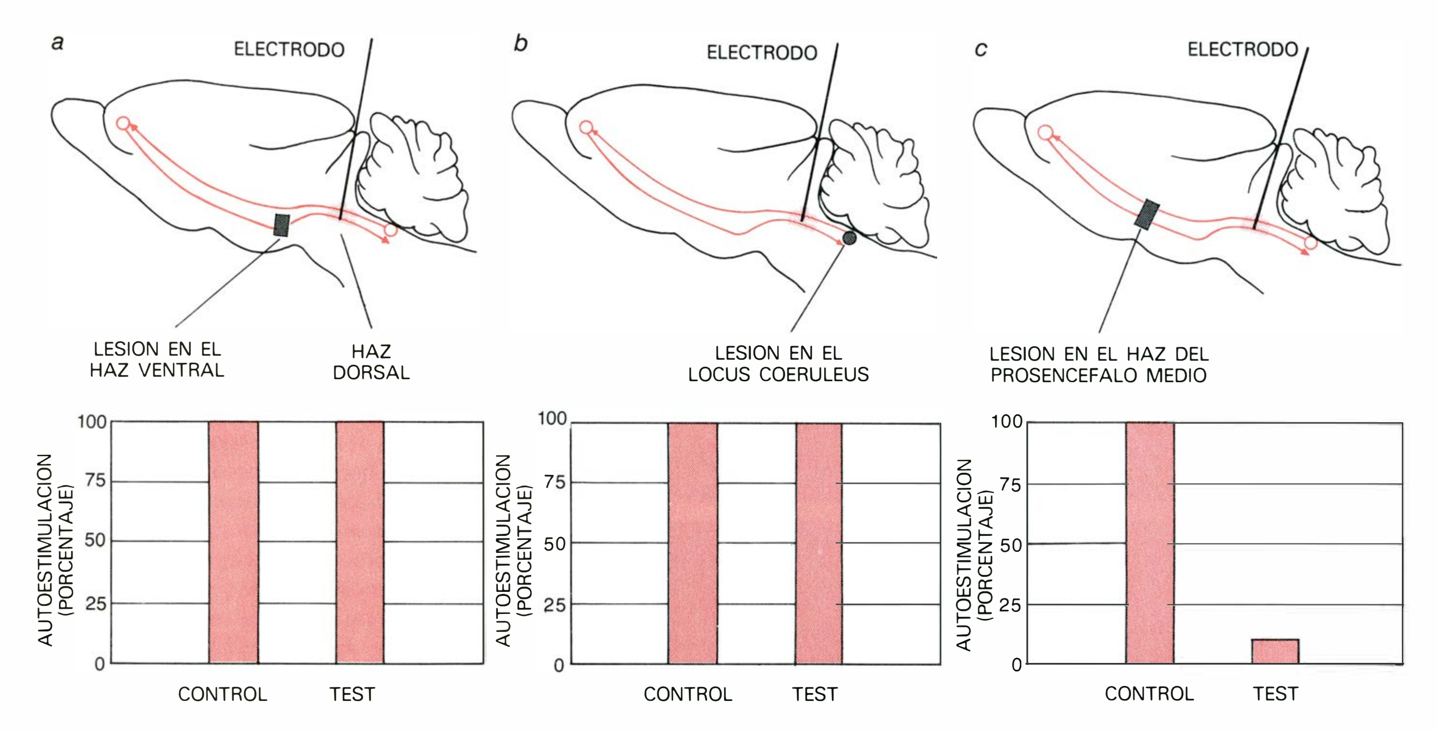
las vías de la catecolamina y de las áreas de autoestimulación no es la única razón para suponer que hay una conexión entre las catecolaminas y el sistema de recompensa del cerebro.

La frecuencia con que las ratas con un electrodo implantado en el cerebro pulsan la palanca para autoestimularse puede modificarse aplicándoles ciertos medicamentos que también interfieren la función de las catecolaminas. Se sabe que los mismos medicamentos alteran el estado de ánimo de los seres humanos; de hecho, a veces se administran para controlar la ansiedad y el comportamiento psicótico. Puesto que hay una conexión entre estos fármacos que alteran la disposición de ánimo y las catecolaminas, y también entre las catecolaminas y el sistema de recompensa del cerebro parece que debiera darse una conexión entre el sistema de recompensa cerebral y la disposición de ánimo y la personalidad.

La norepinefrina y la dopamina son dos importantes catecolaminas que han sido identificadas como neurotransmisores del cerebro. Cuando se activa una célula nerviosa en el sistema de la catecolamina, libera una de estas sustancias. El neurotransmisor cruza la sinapsis, espacio entre el axón terminal de una célula nerviosa y el cuerpo celular de la neurona siguiente. Al ocurrir esto se producen cambios en la permeabilidad de la membrana de la segunda célula nerviosa a los iones del líquido extracelular, con lo que se altera su excitabilidad. La catecolamina se inutiliza luego por un enzima o se devuelve al axón terminal de la primera célula.

Los medicamentos que interesan el sistema de la catecolamina tienen un poderoso efecto sobre el estado de ánimo. Está bastante extendida la opinión de que tales fármacos actúan modificando la transmisión de la catecolamina en la sinapsis, alterando de este modo la capacidad del neurotransmisor para influir en otras células nerviosas. Algunos estudios relacionados con numerosos medicamentos que modifican la transmisión sináptica de la catecolamina han revelado una relación directa: los agentes que elevan los niveles de catecolamina, o que ejercen una acción parecida a la de las catecolaminas, facilitan la autoestimulación; y los agentes que disminuyen estos niveles deprimen la autoestimulación. En este orden, el medicamento *d*-anfetamina potencia tanto la acción de las catecolaminas como la autoestimulación. El medicamento clorpromacina bloquea la acción de las catecolaminas y bloquea también la autoestimulación.

La clorpromacina ha mostrado su eficacia como agente antipsicótico; ello ha dado pie a la suposicion de una relación entre las psicosis y las catecolaminas implicadas en las vías de autoestimulación. Parece posible que, causadas por factores genéticos o am-



EFECTOS de las lesiones cerebrales en el comportamiento de autoestimulación, determinados en experimentos llevados a cabo por el autor y Ronald M. Clavier en el laboratorio de Routtenberg en la Universidad Northwestern. Se implantó un electrodo en el tronco cerebral dorsal de una rata, permitiendo que el animal se autoestimulara pulsando una palanca en una caja de Skinner. Las lesiones en el haz ventral del sistema de la norepinefrina (*a*) no incidieron en el comportamiento de autoestimulación 10 días después de la operación quirúrgica, ni tampoco se dejó sentir la extracción del locus coeruleus (*b*), donde están concentrados los cuerpos celulares con norepinefrina que dan lugar al haz dorsal. En otro orden, la destrucción del haz del prosencéfalo medio (*c*) conduce a un extraordinario descenso en la autoestimulación, lo que sugiere que las fibras de dopamina en esta región resultan esenciales para la recompensa.

bientales, las alteraciones registradas en las rutas de la recompensa cerebral originen cambios permanentes en el estado mental. Larry Stein y C. David Wise, de los Wyeth Laboratories, han sugerido que la causa de la esquizofrenia es una deficiencia enzimática que permite la producción de una sustancia tóxica, la 6-hidroxidopamina, que destruye las vías de la norepinefrina que, según se cree, están asociadas con la recompensa cerebral. Argumentan que estas rutas, visibles en las micrográficas histofluorescentes, son esenciales para las respuestas de comportamiento adaptativas. En apoyo de su hipótesis han demostrado que la 6-hidroxidopamina sintética inyectada directamente en el cerebro de la rata reduce la frecuencia a la que la rata oprime la palanca para obtener la recompensa cerebral. Esta hipótesis tiene un valor especial porque relaciona explícitamente la esquizofrenia con las anormalidades de las vías de recompensa cerebral en particular, que contienen una sustancia transmisora específica.

Una cuestión que ha despertado vivo interés entre los investigadores de la recompensa cerebral está relacionada con las posibles diferencias entre las misiones que cumplen las diferentes catecolaminas. Se han desarrollado varias hipótesis: que la autoestimulación está regulada únicamente por la norepinefrina o por la dopamina; que ambas están implicadas aunque de forma autónoma o que ambas actúan conjuntamente. Ronald M. Clavier y el autor han intentado resolver el problema desde un punto de vista anatómico. Examinamos la contribución de los dos principales sistemas de norepinefrina, denominados haces dorsal y ventral, a la autoestimulación. Primero demostramos que la autoestimulación, en el tronco cerebral, está asociada con el haz de norepinefrina dorsal.

Provocamos lesiones en los lugares en los que se basaba la autoestimulación y observamos que éstas daban lugar a cambios en la fluorescencia histoquímica del haz dorsal, lo cual indicaba que esta región se hallaba asociada con las vías que facilitan la recompensa cerebral. Cambios similares en la fluorescencia histoquímica del haz ventral se presentaron tan sólo a consecuencia de lesiones en áreas cerebrales que no estaban implicadas en la autoestimulación. Por consiguiente, mientras el haz ventral no está asociado con la recompensa cerebral, el haz de la norepinefrina dorsal aparece asociado con ésta.

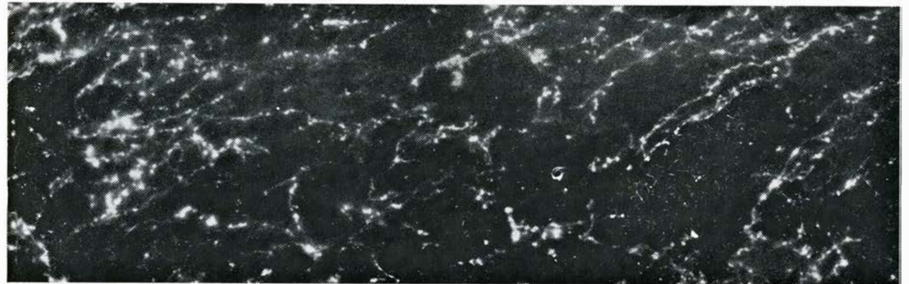
El haz dorsal tiene que ver con la autoestimulación, pero ¿es un componente esencial del sistema de recompensa cerebral? Si la recompensa cerebral resultara de la activación de los axones del haz dorsal, sería de esperar que la destrucción de los cuerpos celulares de estos axones, que se encuentran en un área denominada locus coeruleus, reduciría la autoestimulación.

Clavier y el autor encontraron que esto no ocurría: la casi total destrucción del locus coeruleus apenas incide en la frecuencia de autoestimulación en las ratas. Es interesante, sin embargo, que una lesión limitada al haz del prosencéfalo medio reduzca drásticamente la autoestimulación. Este efecto puede relacionarse con el hecho de que el haz del prosencéfalo medio actúe como una "estación intermedia de placer" para otras vías cerebrales que no contengan norepinefrina.

Tales resultados indican que las rutas de la norepinefrina quizá no sean importantes para la autoestimulación. Por contra, el sistema de la dopamina sí desempeña un papel más crucial, según se desprende del hecho siguiente: una lesión en el haz del prosencéfalo medio que reduzca la autoestimulación daña asimismo dos componentes del sistema de la dopamina en el mesencéfalo: el tegmentum ventral y la substantia nigra, pars compacta. Olds y Ephraim Peretz mostraron, en 1960, que el tegmentum ventral podía mantener la autoestimulación, y Malsbury y yo, examinando el mesencéfalo, el puente de Varolio y la médula anterior, comprobamos, en 1969, que las mayores frecuencias de autoestimulación se obtenían con electrodos colocados en el tegmentum ventral.

Descubrimos también la recompensa cerebral en el otro componente del sistema de la dopamina, la substantia nigra, pars compacta. Yung H. Huang, que era entonces un estudiante graduado en mi laboratorio, mostró la participación de la substantia nigra por medio de bajas corrientes producidas por los hilos de un electrodo, considerablemente más pequeño que los implantados en experimentos anteriores. C. L. E. Broek-





FIBRAS DE DOPAMINA de la corteza frontal del cerebro de rata, en un montaje de micrografías fluorescentes. La superficie del cerebro está en la parte superior del montaje, y las capas más profundas en la parte inferior. Sólo aparecen las fibras de dopamina, puesto que unas semanas antes de que se obtuvieran las micrografías se produjo una lesión en el locus coeruleus del animal que destrozó todas las fibras de norepinefrina de la corteza frontal. Obsérvese que la densidad de las fibras de dopamina es mayor en las capas profundas de la corteza. Las micrografías fueron realizadas por Olle Lindvall, de la Universidad de Lund.

kamp, de la Universidad de Nijmegen, ha demostrado que la autoestimulación de la substantia nigra queda bloqueada por la inyección en el núcleo caudado de la droga haloperidol, la cual inhibe selectivamente la transmisión de la dopamina. La autoestimulación se incrementa por medio de la inyección de anfetamina, que facilita la transmisión de dopamina. Estos resultados indican que los fármacos condicionan la recompensa cerebral al actuar en las células nerviosas del núcleo caudado; y manifiestan asimismo el importante papel que desempeñan los sistemas de la dopamina en los mecanismos de autoestimulación.

Hasta hace muy poco no se sabía que tanto el sistema de la norepinefrina como el de la dopamina enviara sus axones a la corteza cerebral. Este hallazgo es de la máxima trascendencia, toda vez que relaciona la corteza cerebral con las estructuras primitivas profundas del mesencéfalo y del metencéfalo que surgen mucho antes en la evolución del cerebro. Ello abriga la posibilidad de que los patrones de actividad intelectual de la corteza, extraordinariamente complejos e intrincados, estén influidos por los primitivos sistemas de catecolaminas, desde el punto de vista evolutivo.

Aprovechando las recientes mejoras en la sensibilidad de la técnica de fluorescencia es ahora posible distinguir entre los axones de norepinefrina y los de dopamina en la corteza cerebral, tanto de animales de experimentación como del hombre. Hay diferencias en el aspecto visual de las dos redes: las fibras de norepinefrina son más gruesas y tienen más abultamientos que las fibras de dopamina, que son más delgadas y sinuosas.

Aunque ambos sistemas de catecolaminas se encuentran en los lugares de autoestimulación, el sistema de la norepinefrina está distribuido homogéneamente en todas las capas de la corteza frontal y se halla en áreas donde la autoestimulación no ha podido demostrarse. El sistema de la dopamina, por otra parte, ha sido analizado por Brigitte Berger, Ann-Marie Thierry y Jacques Glowinski, del Collège de France, quienes han mostrado que está irregularmente distribuido, con su mayor concentración de axones y terminales de axones localizados en la corteza del surco y media: precisamente en aquellas áreas de la corteza frontal donde se había observado la recompensa cerebral. Recientemente, Timothy y el autor han estudiado los agregados de dopamina fluorescente en la corteza entorhinal, región del lóbulo temporal donde hemos comprobado efectos de recompensa cerebral.

La implicación de ciertas regiones de la corteza cerebral en la autoestimulación puede, por consiguiente, estar relacionada, al menos en parte, con su conexión con los sistemas de la dopamina. Resulta muy tentadora la idea de que los medicamentos que

MEDICAMENTO	NOMBRE COMERCIAL	NEUROTRANSMISORES AFECTADOS	MODO DE ACCION	EFECTO EN LA AUTOESTIMULACION	EFECTO EN EL APRENDIZAJE Y LA MEMORIA
ALFA-METIL-TIROSINA	—	DOPAMINA NOREPINEFRINA	INHIBE LA SINTESIS DE CATECOLAMINAS	DISMINUYE LA FRECUENCIA	EMPEORAMIENTO
RESERPINA	SERPASIL	DOPAMINA NOREPINEFRINA	EVITA ALMACENAMIENTO DE CATECOLAMINAS	DISMINUYE LA FRECUENCIA	EMPEORAMIENTO
6-HIDROXIDOPAMINA	—	DOPAMINA NOREPINEFRINA	MATA LAS CELULAS NERVIOSAS QUE CONTIENEN CATECOLAMINAS	DISMINUYE LA FRECUENCIA	EMPEORAMIENTO
CLORPROMACINA	THORAZINE	DOPAMINA NOREPINEFRINA	BLOQUEA LOS RECEPTORES DE CATECOLAMINAS	DISMINUYE LA FRECUENCIA	EMPEORAMIENTO
ANFETAMINA	DEXEDRINE	DOPAMINA NOREPINEFRINA	DIFICULTA LIBERACION DE CATECOLAMINAS EN LA SINAPSIS	AUMENTA LA FRECUENCIA	FACILITACION (DOSIS BAJAS)
IMIPRAMINA	TOFRANIL	DOPAMINA NOREPINEFRINA	EVITA QUE SE VUELVAN A CAPTAR CATECOLAMINAS DE LA SIPNASIS	AUMENTA LA FRECUENCIA	INCIERTO (INFORMACION INSUFICIENTE)
FENOXIBENZAMINA	DIBENZYLINE	NOREPINEFRINA	BLOQUEA LOS RECEPTORES DE LA ALFA-NOREPINEFRINA	DISMINUYE LA FRECUENCIA	INCIERTO
PROPANOLOL	INDERAL	NOREPINEFRINA	BLOQUEA LOS RECEPTORES DE LA BETA-NOREPINEFRINA	DISMINUYE LA FRECUENCIA	INCIERTO
CLONIDINA	CATAPRES	NOREPINEFRINA	DISMINUYE LA LIBERACION DE NOREPINEFRINA	DISMINUYE LA FRECUENCIA	INCIERTO
HALOPERIDOL	HALDOL	DOPAMINA	BLOQUEA LOS RECEPTORES DE LA DOPAMINA	DISMINUYE LA FRECUENCIA	EMPEORAMIENTO
APOMORFINA	—	DOPAMINA	ESTIMULA LOS RECEPTORES DE LA DOPAMINA	AUMENTA LA FRECUENCIA	FACILITACION (DOSIS BAJAS)

EFECTOS de los medicamentos psicótropos en el comportamiento de autoestimulación y en el aprendizaje y memoria en la rata son resumidos en esta tabla. Los fármacos que facilitan la transmisión de la dopamina y la norepinefrina en la sinapsis tienden a potenciar el comportamiento de autoestimulación; al bloquear los medicamentos, este comportamiento tiende a inhibirse. Según parece, estos fármacos tienen otros efectos paralelos en el aprendizaje y la memoria.

interesan la dopamina, que manipulan el estado de ánimo y alivian el comportamiento psicótico, pueden alcanzar parte de su efecto por medio de estos sistemas de catecolaminas de la corteza que soportan la recompensa cerebral.

El que nuestras recientes investigaciones sobre la recompensa cerebral hayan involucrado a la corteza entorhinal entre las áreas de mantenimiento de la autoestimulación encierra considerable interés. Las fibras de esta región se proyectan en el hipocampo, estructura cerebral que se cree que está relacionada con la formación de la memoria, y, según prueban experiencias actuales, conectada también con la memoria de relaciones espaciales. Una conexión entre la recompensa cerebral y el aprendizaje ha sido reconocida desde 1961, cuando Olds y su esposa Marianne E. Olds demostraron que la estimulación de los lugares de recompensa interrumpía el aprendizaje en los animales de experimentación. Desde entonces, los neurólogos han progresado en su comprensión no solamente de la unión que existe entre recompensa y aprendizaje sino también de la misión que cumplen las rutas de autoestimulación en la formación de la memoria.

Tengo para mí que las vías de recompensa cerebral pueden funcionar como las vías de la consolidación de la memoria. Con esto, lo que quiero decir es que cuando algo se está aprendiendo, la actividad en las rutas de la recompensa cerebral facilita la formación de la memoria. Si estas vías son estimuladas eléctricamente en el curso de un proceso de aprendizaje, debido al efecto de la saturación de los circuitos y a la alteración de la actividad fisiológica normal asociada con el proceso, sería de esperar que la memoria de lo que se está aprendiendo disminuyera. Esta hipótesis ha sido confirmada de manera bastante convincente por los estudios que yo he realizado con Elaine Bresnahan, Nancy Holzman y Rebecca Santos-Anderson. Encontramos que la estimulación continua de las regiones de recompensa cerebral en el haz del prosencéfalo medio, la substantia nigra o la corteza frontal aplicada en el curso del aprendizaje de una simple tarea, interrumpe la capacidad del animal de experimentación de recordar la tarea después de 24 horas. Por otra parte, la estimulación del locus coeruleus, que aparentemente no está implicado en la recompensa, no tiene efecto en la retención de la tarea.

Resulta sorprendente la implicación de la substantia nigra en los procesos de la memoria debido a que suele estar asociada con el control del movimiento. (Un mal funcionamiento de la substantia nigra ha sido específicamente relacionado con la enfermedad de Parkinson.) Sin embargo, Haing-Ja Kim ha demostrado en mi laboratorio que las inyecciones de sustancias específicamente activantes de la substantia nigra causan una liberación de dopamina, cuya consecuencia es una alteración de la memoria. Parece probable que el sistema de la substantia nigra interviene en los procesos de comportamiento, además del control del movimiento, y que el sistema resulta determinante en la formación de la memoria.

Collier y yo encontramos que la corteza entorhinal desempeña un interesante papel en la relación entre la autoestimulación y la formación de la memoria. La estimulación artificial aplicada a este área durante el aprendizaje no tiene efecto en la memoria, pero cuando es aplicada después del aprendizaje, reduce la memoria. Este hallazgo importa por cuanto significa que la estimulación cerebral no produce el mismo

efecto sobre la memoria en todas las zonas del cerebro y en cualquier momento. Los resultados de nuestras investigaciones en la corteza entorhinal sugieren que la estimulación debe aplicarse tanto en la región cerebral apropiada como en el momento justo en el proceso de aprendizaje, con el fin de perturbar la memoria.

De esta investigación se desprende una cuestión paradójica: si la estimulación cerebral es recompensante, ¿por qué ésta obstruye el aprendizaje en vez de mejorarlo? El problema se ha estudiado con cierto detenimiento y parece que el efecto se relaciona, al menos en parte, con la forma como se ha administrado la estimulación. Norman White, de la Universidad McGill, ha demostrado que si a los animales se les da la oportunidad, después del aprendizaje, de apretar la palanca para conseguir una estimulación cerebral recompensante, en vez de recibir ésta continuamente como en nuestros experimentos de memoria-recompensa, recuerdan mejor su cometido. La mejora en el aprendizaje puede deberse al hecho de que los animales autorregulan la frecuencia de estimulación, reforzando de este modo su comportamiento. Otros estudios apoyan también la posición mantenida en mi laboratorio de que esta mejora de la memoria se ve facilitada, en gran parte, por el sistema de la dopamina de la substantia nigra.

El papel de las vías de la autoestimulación en el aprendizaje y en la memoria continúan centrando el interés de no pocos de los investigadores que se ocupan de la recompensa cerebral. Antes de su muerte, Olds había estado registrando la actividad de las células nerviosas individualmente a lo largo de todo el cerebro, durante el aprendizaje en ratas y con independencia de movimientos, investigación que prosiguió Marianne Olds. James Olds había descubierto que ciertas células nerviosas se activan 20 milisegundos o menos después de la presentación de una señal que el animal reconoce, por aprendizaje anterior, que se trata de una advertencia de alimento. Muchas de estas células estaban en la substantia nigra, región que, según mis investigaciones, está conectada con las rutas de recompensa cerebral.

Las pruebas muestran, sin ambages, que las vías de la recompensa cerebral desempeñan un papel importante en el aprendizaje y la memoria. Gran parte de la planificación de la investigación en el estudio de la recompensa cerebral puede aplicarse a este área. Sin descontar los análisis anatómicos de las rutas cerebrales y el uso de medicamentos que afectan a la función de los neurotransmisores específicos. En conexión con ello, resulta de particular interés el que ciertos compuestos de acción parecida a la anfetamina, que potencian el sistema de autoestimulación, son los principales medicamentos terapéuticos prescritos para niños con alteraciones neurológicas de atención y aprendizaje.

Estas consideraciones permiten abrigar la esperanza de que conforme más se vaya conociendo sobre las vías de la autoestimulación y su relación con el aprendizaje, se irán descubriendo nuevos métodos terapéuticos para tratar a los pacientes con alteraciones en el aprendizaje y en la memoria.

Resumiendo, la nueva información acerca del sistema de fibras de catecolamina ha hecho posible configurar una representación de las vías cerebrales de la autoestimulación tan detallada como las rutas de los sistemas sensorial y motor, perfectamente conocidos. La comprobación de los efectos de recompensa de estímulos eléctricos localizados, del control de la recompensa cerebral por medicamentos psicótropos y la asociación de las vías de recompensa con la formación de memoria indica que el sustrato nervioso de la autoestimulación desempeña un papel vital en la orientación del comportamiento. Se ha demostrado, además, que los sistemas de recompensa están presentes en todos los niveles del cerebro, de la médula oblonga a la corteza cerebral.

Desde los tiempos en que el haz del prosencéfalo medio se designó centro de placer, las fronteras del sistema de recompensa cerebral han ido abriéndose en profundidad, hacia el interior del tronco cerebral, y han progresado en la corteza del lóbulo central del cerebro. Pero todos los sistemas de recompensa tienen vías a través del haz del prosencéfalo medio, lo cual pone de manifiesto que esta región del hipotálamo podría describirse como una estación intermedia a través de la cual se dispondrían las rutas de recompensa cerebral.

Sería muy deseable, desde luego, que la tecnología de la estimulación cerebral y la información derivada del estudio de la anatomía del sistema de recompensa pudiera aplicarse a la mitigación de las enfermedades nerviosas causadas por desórdenes en el sistema de recompensa. De tales aplicaciones, sin embargo, se ha abusado en el pasado.

A todos los neurólogos urge la responsabilidad de limitar el uso de las técnicas de estimulación cerebral en humanos a los fines exclusivamente terapéuticos, y evitar aplicaciones inciertas o no éticas de estas técnicas. Además, los neurólogos deben estar preparados para comunicar el aspecto positivo de sus trabajos a una sociedad recelosa de un "control de la mente". El valor potencial, para la sociedad, de la aplicación de tales conocimientos a las alteraciones fisiológicas de la personalidad y de la función mental, exigen una continuada investigación básica y un esfuerzo por tender puentes de conexión con la medicina clínica.



El sistema de control de vuelo de los hermanos Wright

Los planeadores y aviones motopropulsados de los Wright tenían un timón de profundidad en la parte anterior del fuselaje en lugar de en su parte posterior. El sistema podría parecernos inestable, pero ellos sabían lo que hacían

Frederick J. Hooven

Wilbur y Orville Wright inventaron el avión controlable. Hasta su primer vuelo en público, en 1908, existía la creencia de que un avión motopropulsado sería similar en su comportamiento a una aeronave más ligera que el aire, vehículo estable que podría guiarse a derecha e izquierda mediante un timón de dirección, y hacia arriba y abajo mediante otro timón de profundidad. Cabía esperar que fuese posible subir en un vehículo de este tipo y volarlo sin habilidad previamente adquirida, y esto fue lo que se vino invariablemente intentando hasta que los Wright enseñaron la forma en que debía procederse.

Por el contrario, los Wright, que eran fabricantes de bicicletas, concibieron el avión desde un principio como vehículo que, a semejanza de la bicicleta, depende de su operador no sólo en su dirección sino también en su equilibrio. Les parecía natural, por tanto, el que, antes de que pudiera confiarse en operar con éxito un avión motopropulsado, fuese necesario desarrollar no sólo el avión sino también la habilidad que requería su manejo.

El diccionario define la estabilidad del avión en los siguientes términos: característica del aparato en vuelo que hace que vuelva a la condición de equilibrio o vuelo estacionario, si se perturba dicha condición. Existen diversos grados de estabilidad, y aunque casi todos los aviones de hoy en día poseen la suficiente para recuperar su equilibrio tras pequeñas perturbaciones, ninguno posee bastante como para asegurar el equilibrio en todas las condiciones posibles. El avión debe mantener su equilibrio con respecto al aire, y un avión muy estable requiere aire en calma para poder avanzar suavemente; el avión muy estable sirve al viento y no a su piloto. Existen también diversos grados de inestabilidad. La bicicleta es inestable, pero su inestabilidad es tal que puede compensarse fácilmente mediante el alto grado de control que el operador tiene sobre el equilibrio de la máquina. Una vez que el operador ha conseguido la habilidad necesaria, el control se efectúa instintivamente y el equilibrio no resulta ningún problema. El avión inicial de los Wright era inestable. Hasta 1905 no consiguieron una máquina propulsada con un grado de inestabilidad suficientemente bajo combinado con un grado de control suficientemente alto, que les permitiese adquirir la habilidad necesaria y realizar su objetivo de vuelo controlado práctico.

El vuelo de un avión requiere tres tipos de control, que corresponden a sus tres ejes de rotación: balance, guiñada y cabeceo. El balance es la rotación alrededor del eje longitudinal horizontal; determina la actitud lateral del avión (ala izquierda levantada o ala derecha levantada). Antes de los Wright no existía el concepto de control lateral. Se había descubierto en el vuelo de modelos que, dando un diedro a las alas, esto es, elevando el extremo del ala con respecto al encastre se obtenía suficiente estabilidad para mantener el equilibrio alrededor del eje longitudinal en vuelo rectilíneo. Los Wright, que eran cuidadosos observadores de las aves que planean, se dieron cuenta de que aunque algunos pájaros (palomas y buitres, por ejemplo) utilizan el diedro, muchos no lo hacen, y que todos los pájaros que planean hacen sutiles cambios en la configuración de sus alas para controlar su equilibrio lateral. Los Wright fueron, por tanto, los primeros que concibieron la idea de aumentar la sustentación en un lado del avión y disminuirla simultáneamente en el otro, como medio para conseguir el control lateral. Tuvieron, por último, la idea de alabear las alas, de forma que una de ellas se presente al viento a un ángulo mayor que la otra. Hoy día esto se consigue mediante alerones, pequeñas superficies de mando situadas a lo largo del borde de salida del ala que modifican las características de sustentación de la misma para conseguir idéntico fin.

Los cambios en guiñada, esto es, las rotaciones alrededor del eje vertical, determinan la dirección de la trayectoria hacia la izquierda o hacia la derecha. El control de guiñada se efectúa mediante un timón de dirección, que es una superficie vertical de control colocada por los Wright en la parte posterior de la aeronave, como lo había estado en todos los demás vehículos voladores o flotantes. Los ciclistas están habituados a inclinarse lateralmente cuando doblan una esquina, lo que se consigue desde luego mediante control lateral; así, los controles lateral y direccional están íntimamente relacionados. El desarrollo de esta interrelación fue uno de los triunfos de los Wright en su camino para conseguir el control y aprender a volar.

El control de cabeceo, o morro arriba-abajo, puede considerarse como substancialmente independiente de los otros controles. El control de cabeceo presentó a los Wright problemas inesperados que no se materializaron hasta que hubieron construido y volado aviones motopropulsados. La solución de estos problemas ocupó gran parte del período de dos años que transcurrió entre el primer vuelo propulsado en 1903 y la consecución final del vuelo práctico, dos años más tarde. El control de ca-

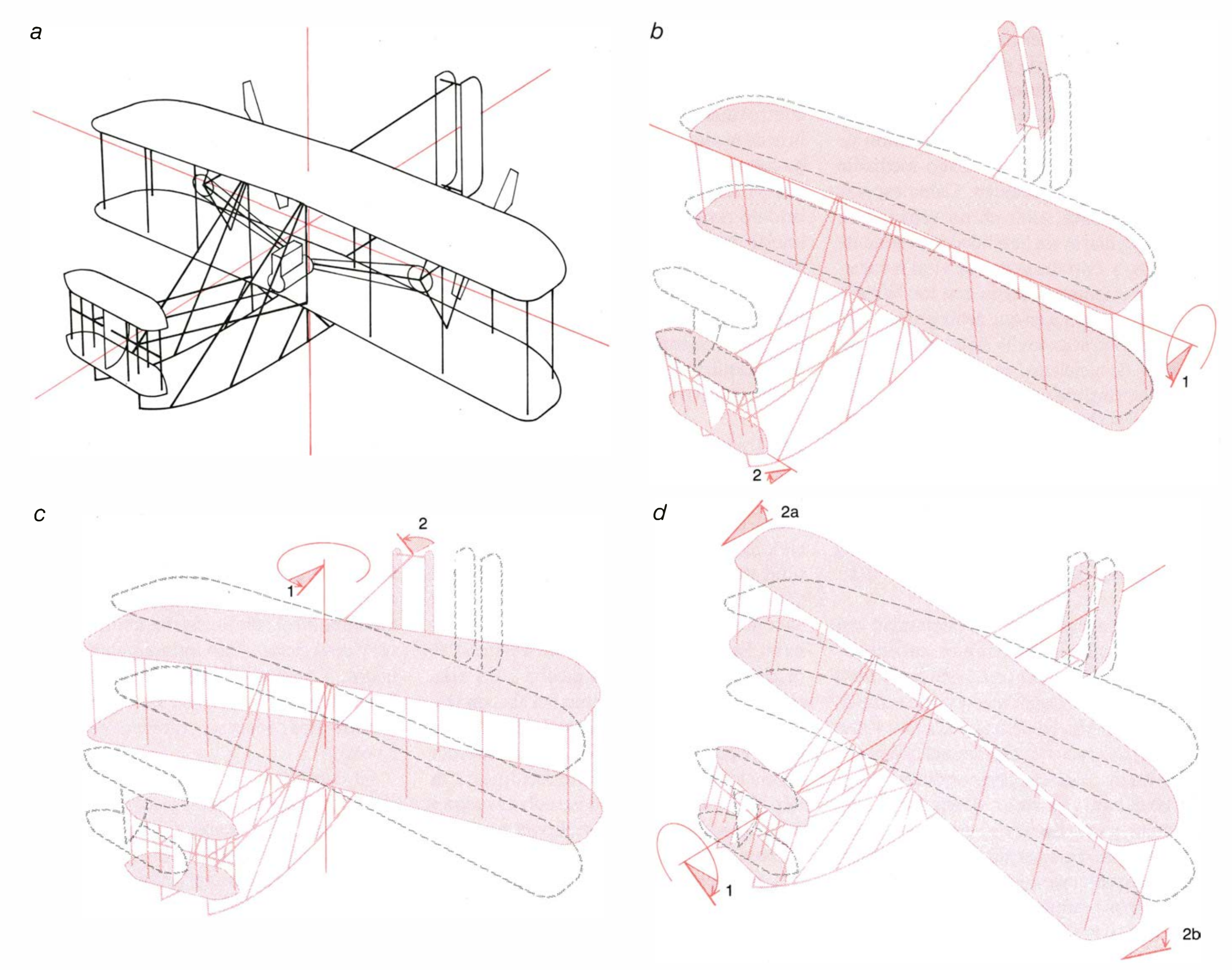
AVION TIPO "A" de los Wright (Wilbur y Orville), modelo exhibido en 1908 en los Estados Unidos y en otros países, en la fotografía de la página opuesta. Orville Wright pilota la máquina sobre el campo de instrucción de Fort Myer, en el estado de Virginia, durante una demostración para el Ministerio de Defensa estadounidense, el 9 de septiembre de 1908. En Francia, Wilbur Wright estableció ese mes los récords de altitud y autonomía.

beceo se consigue mediante el timón de profundidad o estabilizador, que suele instalarse detrás de las alas, pero que los Wright colocaron delante de ellas en todos sus aviones construidos antes de 1910.

Un avión se equilibra distribuyendo su peso a lo largo del eje longitudinal, de forma que el centro de gravedad coincida lo máximo posible con el centro de presiones del ala. De esta manera, el aparato está equilibrado en su centro de gravedad de modo similar a como el brazo de una balanza está equilibrado en su fulcro. Sin embargo, el peso se desplaza en vuelo, como consecuencia del movimiento de los pasajeros y del vaciado de los depósitos de combustible, y es evidente que se precisa de algún medio auxiliar que permita levantar o empujar en el morro o cola del avión a fin de mantener el equilibrio. Otra influencia perturbadora es el hecho de que el fulcro, centro de presiones del ala, cambie de posición al cambiar la actitud de vuelo del avión.

Cuando los Wright comenzaron su trabajo, los datos existentes indicaban que el movimiento del centro de presiones tendería a hacer el avión estable en vuelo. Ello significaba que, cualquier cambio de actitud a partir de la condición de equilibrio, induciría un cambio de la misma que tendería a restaurar el equilibrio original. Si se hiciese que el avión adoptase una actitud con el morro más levantado, suponiendo que este cambio de actitud originase un desplazamiento del centro de presiones hacia atrás, el avión sería estable, ya que tal desplazamiento tendería a bajar el morro del mismo. En lugar de ser así, los Wright descubrieron que, cuando el ala tiene curvatura, el desplazamiento del centro de presiones sobre gran parte del margen de actitudes es en la dirección opuesta, lo que hace que el avión sea inestable. Por tanto, se exigía al operador que utilizase el timón de profundidad no sólo para cambiar la actitud y dirección del avión, sino también que lo manipulase para equilibrar constantemente la actitud, de la misma forma en que el ciclista utiliza el manillar para controlar la dirección y para equilibrar la máquina.

En su primer planeador pilotado que voló en 1900, los Wright descubrieron que podían compensar esta inestabilidad colocando el timón de profundidad en la parte posterior de las alas, lo que hicieron volando simplemente el planeador hacia atrás. A pesar de la inestabilidad decidieron, sin embargo, mantener el estabilizador en su posición por delante del ala. Como eran ciclistas, la inestabilidad no les constituía ningún problema. Persistieron con esta práctica, no sólo con todos sus planeadores, sino también con sus aviones motopropulsados construidos antes de 1910, fecha en la que adoptaron el convencional estabilizador ho-



MOVIMIENTO ALREDEDOR DE LOS TRES EJES, que debe controlarse en vuelo. En *a* se muestran los tres ejes (cabeceo, guiñada y balance). En *b* se representa el movimiento morro hacia abajo (*1*), alrededor del eje de cabeceo; el equilibrio se reinstaura desplazando el timón de profundidad en una posición morro hacia arriba (*2*). En *c* se esquematiza el movimiento alrededor del eje de guiñada, viraje hacia la izquierda (*1*); el equilibrio se restablece deflectando el timón de dirección a una posición de viraje a la derecha (*2*). En *d* se muestra el movimiento alrededor del eje de balance, bajada del ala izquierda (*1*); los Wright restablecían el equilibrio alabeando las alas (*2a, 2b*) a una posición de ala izquierda hacia arriba. El vuelo de un avión requiere tres tipos de control, que corresponden a sus tres ejes.

rizontal posterior para los primeros aviones que fabricaron en serie.

La configuración con estabilizador anterior fue conocida posteriormente como "canard", en razón de una supuesta semejanza con un pato. Los proyectistas de aviones han acusado generalmente a esta configuración de ser inestable, y los historiadores han criticado a los Wright por persistir en el uso de la misma en sus aviones motopropulsados. ¿Por qué lo hicieron así? Para contestar esta pregunta es necesario volver a los comienzos del interés de los Wright por el vuelo humano.

Antes de los Wright, los únicos vuelos en vehículos más pesados que el aire habían sido efectuados por pilotos de planeadores del tipo de piloto suspendido de la aeronave. El primero y más grande de los mismos fue Otto Lilienthal, un brillante ingeniero alemán por quien los Wright sentían gran admiración; él calculó las mejores tablas aerodinámicas anteriores a las de los Wright. Lilienthal falleció en 1896, cuando una ráfaga hizo que su planeador perdiese velocidad y se desplomase al suelo. Esta pérdida de velocidad es lo que hoy día se conoce como "pérdida". Casi siempre viene seguida de un picado, y si el avión tiene altitud suficiente, el picado le permite recuperar la velocidad de vuelo. Como un planeador del tipo de piloto suspendido vuela normalmente a baja altitud, no suele haber espacio suficiente para este tipo de maniobra.

La noticia de la muerte de Lilienthal atrajo la atención de los Wright, y poco después comenzaron a pensar en el vuelo de planeo como deporte. Desde un principio pretendieron diseñar un planeador controlable mediante cambios de ángulo de estabilizador horizontal. Decidieron colocar dicho estabilizador por delante del ala, en la creencia de que impediría el picado que sigue a la pérdida. Lilienthal y sus seguidores habían colocado estabilizadores fijos en la parte posterior de sus máquinas; el control de que disponían lo conseguían desplazando el peso del operador. Esto proporcionaba un control escaso sobre la actitud del avión y casi nulo sobre su dirección; iba sencillamente hacia donde el viento lo llevaba.

En 1899, los Wright construyeron una cometa biplano con una envergadura de 1,52 metros, en la que incorporaron su sistema de control de balance mediante alabeo del ala, y descubrieron que respondía al mismo. Procedieron entonces a proyectar su máquina de 1900 y a buscar un lugar en que existiesen vientos suficientemente estacionarios como para poder volarla como una cometa, y donde hubiera colinas arenosas para planear y aterrizar sin accidentes. Se establecieron en las dunas de arena próximas a Kitty Hawk, Carolina del Norte.

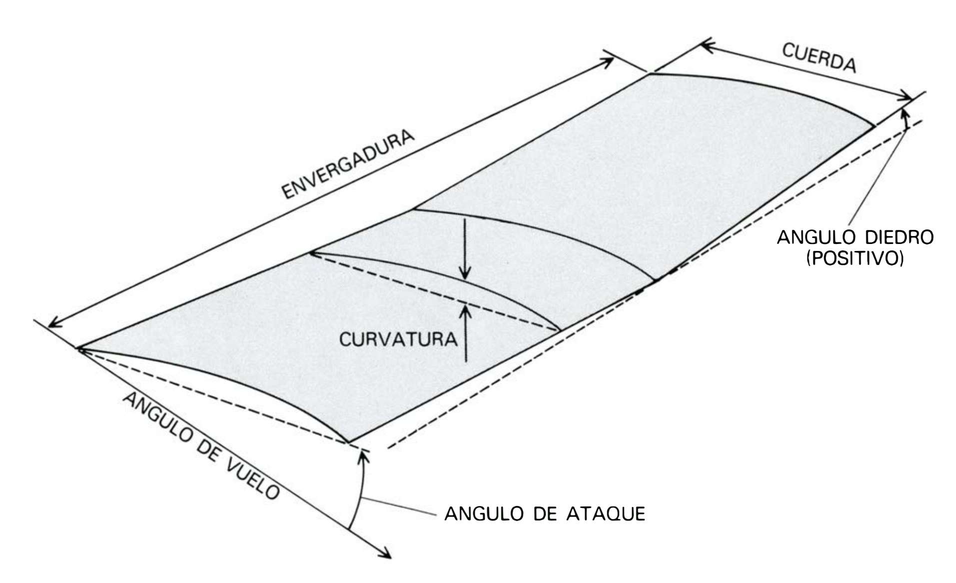
La primera máquina de los Wright carecía de timón de dirección. Dependía de la inclinación de sus alas hacia la izquierda o hacia la derecha, esperando que giraría en la dirección en la que había sido inclinada, de acuerdo con la experiencia obtenida con los planeadores de piloto suspendido. Su sistema de control supuso una mejora importante sobre dichos planeadores, ya que al no requerirse que el operador desplazase su peso como medio de control, éste podía estar tendido sobre el ala inferior, reduciendo así, de un modo importante, la resistencia aerodinámica de su cuerpo. Los Wright se dieron cuenta también de que su sistema de control resultaría eficaz en máquinas demasiado pesadas para controlarlas mediante desplazamiento del peso del piloto, máquinas que estarían motopropulsadas.

En primer lugar volaron su planeador como una cometa, midiendo con minucioso cuidado las fuerzas de sustentación y resistencia y, a la vez, la velocidad del viento con un anemómetro. Su cuidadosa medición de los ángulos de los cables que sujetaban la máquina les permitió efectuar a veces correcciones fundamentales en los datos aerodinámicos entonces disponibles. Desde un principio dudaron de la precisión de las tablas de Lilienthal, que habían aplicado al diseño de sus planeadores de 1900 y 1901.

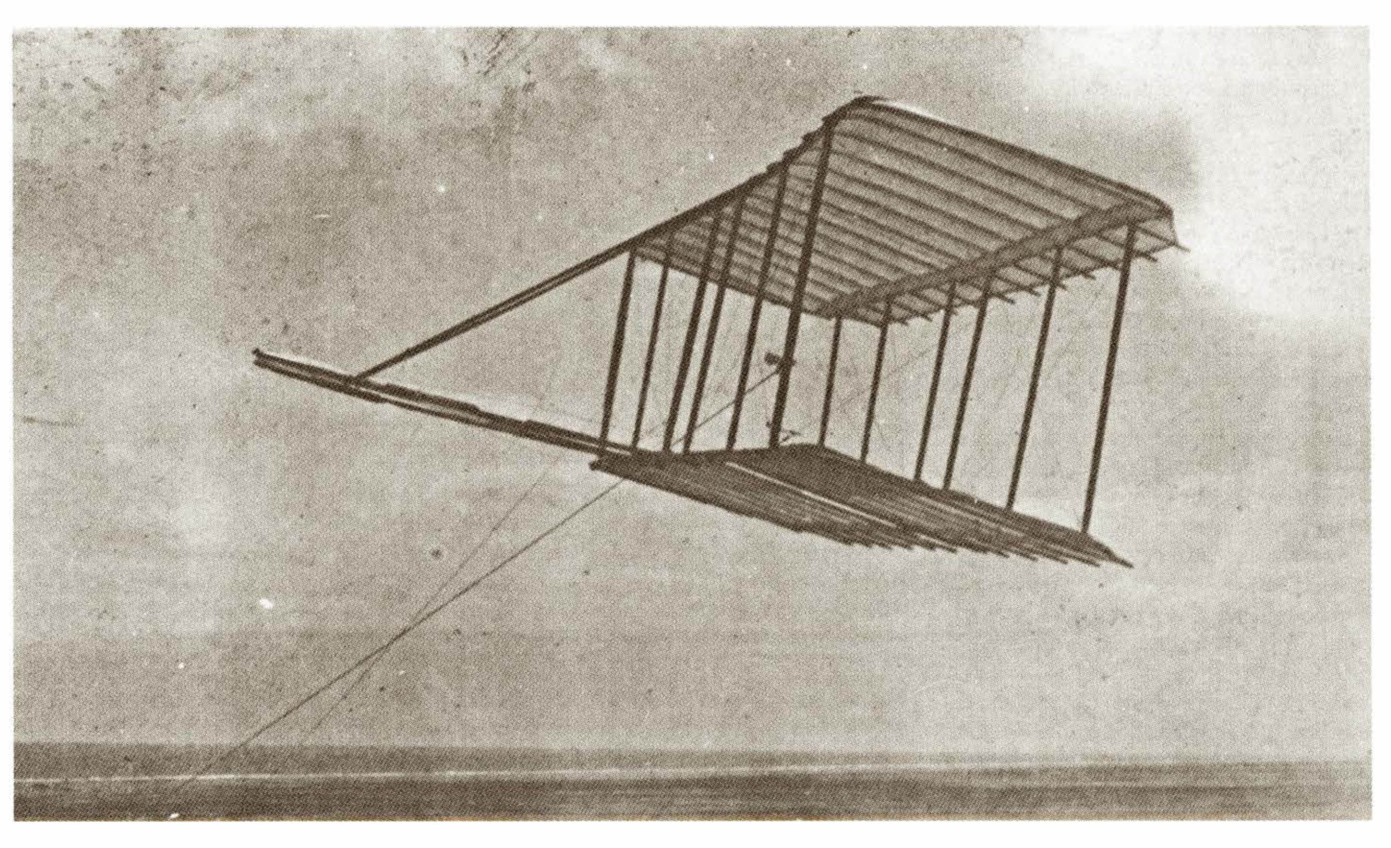
Los Wright volaron también la máquina como planeador, experimentando con el diedro de las alas. Descubrieron que esto daba lugar a que reaccionase ante cualquier viento lateral, interfiriendo con la elección de dirección efectuada por el piloto. Fue esta máquina la que volaron hacia atrás con el estabilizador horizontal en la parte posterior, descubriendo que este sistema aumentaba la estabilidad. Sin embargo, como concedían más importancia a que el avión estuviese libre del peligro de picar que a la estabilidad, dejaron el estabilizador horizontal en la parte anterior del avión.

Fue un buen principio. El sistema de control actuaba de forma satisfactoria; el plan de volar la máquina como cometa había funcionado en la forma prevista, aunque algunos de los datos no estaban de acuerdo con las tablas existentes, y la corta experiencia obtenida con vuelos de planeo había resultado prometedora y divertida. Comenzaron inmediatamente a proyectar un nuevo planeador de mayor tamaño para 1901. Tenía 27 metros cuadrados de superficie alar (en lugar de 15 metros cuadrados) y alas de mayor curvatura. Este planeador resultó una decepción. Era tan inestable que resultaba difícil de controlar y su ángulo de planeo era mayor que el del planeador de 1900.

Los Wright reconstruyeron las alas para disminuir su curvatura, y las modificaron para mejorar las características aerodinámicas del borde de ataque. Estos cambios resolvieron completamente el problema de la estabilidad y mejoraron el ángulo de planeo. La forma de la sección del ala tras la modificación puede verse con nitidez en una foto del planeador en vuelo [*véase la ilustración inferior de la página siguiente*]. La curvatura inversa visible en la mitad posterior del perfil del ala es típica de las secciones diseñadas para impedir el desplazamiento inestable del centro de presiones en las alas con



TERMINOLOGIA DEL PERFIL, definida en este diagrama estilizado del ala del planeador de 1900. La envergadura es la distancia real de extremo a extremo del ala; la cuerda es la distancia del borde de ataque al borde de salida. El producto de la cuerda por la envergadura da la superficie total del ala. El alargamiento es la relación entre la envergadura y la cuerda. Un ala larga y estrecha tiene un alargamiento elevado; un ala corta y ancha tiene un alargamiento bajo. Si el ala está formada por dos planos, el ángulo que constituye es un diedro; aquí el ángulo diedro es positivo. Un ala con una sección recta curvada tiene curvatura. El ángulo con el cual el ala está inclinada con respecto a la dirección del movimiento es el de ataque; si es demasiado elevado se produce la pérdida.



PLANEADOR DE 1900, que se muestra volando como una cometa en esta fotografía; tenía únicamente dos controles, el alabeo para mantener el equilibrio alrededor del eje de balance y un timón de profundidad-estabilizador anterior, apenas visible a este ángulo, para mantener equilibrio alrededor del eje de cabeceo. Las alas estaban montadas con un diedro ligeramente negativo. Como señala esta vista, que está tomada casi de perfil, las alas se construyeron con pequeña curvatura.

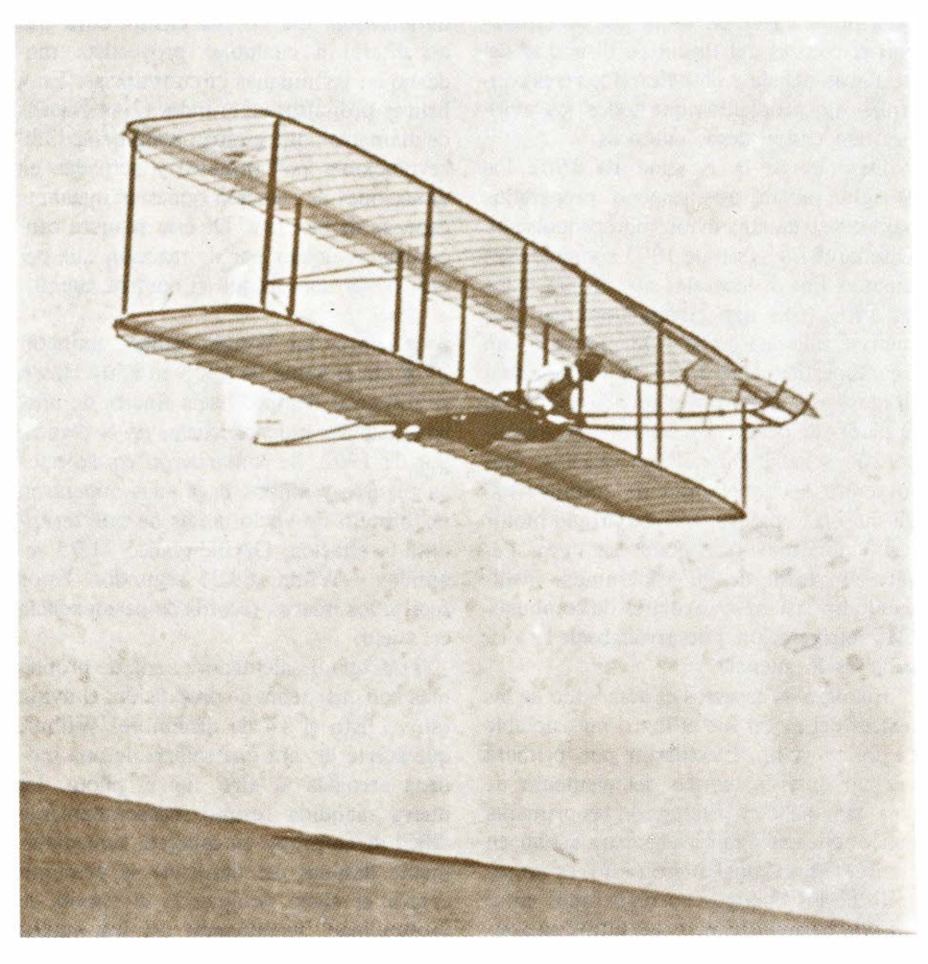
PLANEADOR 1901, que se muestra en esta fotografía con Wilbur Wright como piloto. Tenía también dos controles sólo: alabeo del ala para control alrededor del eje de balance y un estabilizador horizontal-timón de profundidad móvil para control alrededor del eje de cabeceo. El estabilizador horizontal, formado por una sola superficie, poseía un alargamiento bajo. Las alas de 1901 se construyeron inicialmente con más curvatura que las de 1900, pero fueron aplanadas luego, como puede apreciarse aquí, a fin de mejorar la estabilidad. Se entiende por balance la rotación alrededor del eje longitudinal horizontal; determina la actitud lateral.

curvatura. De esto puede inferirse que la máquina de 1901 era realmente estable, conclusión que está confirmada por una nota en el diario de E. C. Huffaker, quien visitó el campo de los Wright en 1901 y observó cómo efectuaban varios vuelos en la máquina con el timón de profundidad fijo.

Los Wright hicieron muchos vuelos en este planeador, que les proporcionó dos motivos especiales de satisfacción. Su sistema de control lateral actuaba con pleno éxito. Por dos veces se hallaron en el mismo tipo de pérdida que causó la muerte de Lilienthal. Y en lugar de entrar en picado, la máquina se posó sobre el suelo sin mayores daños. Esto confirmaba lo sabio de su elección del estabilizador horizontal anterior.

La máquina de 1901 los convenció de que, como las tablas aerodinámicas de Lilienthal contenían errores importantes, deberían efectuar sus propias mediciones si querían construir un avión motopropulsado que tuviese éxito. Tras regresar a su hogar en Dayton, Ohio, procedieron a medir las características aerodinámicas de más de 60 modelos de ala con diversas curvaturas, forma en planta, alargamiento y espesor, aisladas y en configuración biplano. En estos estudios trabajaron con un pequeño túnel aerodinámico de construcción propia. Decidieron muy acertadamente no intentar medir las pequeñas fuerzas sobre sus modelos, sino la relación entre dos fuerzas aerodinámicas dentro de la corriente, hallando la dirección de la resultante de las mismas. Para este propósito utilizaron dos paralelogramos articulado distintos, construidos con gran ingenio con radios de bicicleta. Uno de los paralelogramos medía la sustentación del modelo del ala, comparándolo con la resistencia de una placa plana normal a la corriente. El otro paralelogramo medía la resistencia comparándola con la sustentación. Las fuerzas en un ala de tamaño real podían así predecirse comparándolas con las fuerzas sobre una placa plana de tamaño real, medida en los vientos estacionarios de Kitty Hawk mediante los meticulosos procedimientos de los Wright. De esta forma evitaron las peores dificultades del ensayo con modelos en pequeña escala: la dificultad de medir fuerzas pequeñas, y quizá no estacionarias, y los efectos de escala que resultan de la viscosidad del aire (de cuya existencia probablemente no eran conscientes).

Trabajando esta vez con sus propias tablas, los Wright diseñaron el planeador de 1902. Era aún mayor que la máquina de 1901, con una envergadura de 9,75 metros, en lugar de los 6,7 metros de dicha máquina, y una cuerda de sólo 1,5 metros, en lugar de los 2,1 metros de la misma. Pesaba más de 45 kilogramos. Nada de ese tamaño había volado antes. La superficie alar de 29,7 metros cuadrados no era mucho mayor que los 26,9 del planeador de 1901, pero el mayor alargamiento, con una envergadura de 6,4 veces la cuerda, daba lugar a una sustentación considerablemente mayor. La máquina incluía por primera vez un par de superficies verticales, fijas por detrás de las alas, para estabilizar el movimiento alrededor del eje de guiñada.



PLANEADOR DE 1902, de nuevo con Wilbur Wright como piloto. Tenía un sistema de control alrededor de los tres ejes: alabeo del ala para control de balance, estabilizador simple (de mayor alargamiento y situado más hacia adelante) para control de cabeceo y un timón de dirección simple vertical para control de guiñada. Los Wright colocaron, al principio, un timón de profundidad fijo bastante por detrás del ala. El timón de dirección móvil fue instalado, en sustitución del fijo, en Kitty Hawk, para mejorar el control sobre el acoplamiento de los movimientos alrededor de los ejes de balance y de guiñada. Los Wright obtuvieron entonces, por primera vez, el control potencial sobre los 3 movimientos de vuelo. Los cambios en guiñada determinan la dirección de la trayectoria.

Este planeador fue un éxito desde el principio. Los Wright batieron pronto con él todos los récords de autonomía y de ángulo de planeo. La aleta vertical en la parte posterior demostró ser un avance con respecto a planeadores anteriores en el desarrollo de la compleja interacción de los controles de guiñada y lateral en el viraje. Los Wright habían descubierto que su método de virar, elevando un lado de la máquina, no trabajaba tan bien como habían esperado. Así, para dar un viraje hacia la izquierda, levantaban el ala derecha, pero entonces en lugar de virar a la izquierda la máquina exhibía una tendencia a virar hacia la derecha, ya que al tener el ala derecha mayor sustentación encontraba también mayor resistencia y esto impedía que el ala derecha se adelantase en la forma esperada. Estando así en una actitud de balance y sin realizar el viraje, la máquina se desplazaba lateralmente resbalando hacia la izquierda, y el vuelo terminaba al llegar al suelo.

La aleta fija posterior había tendido a corregir esta condición haciendo que la máquina virase en la dirección del resbalamiento. La corrección era, sin embargo, demasiado pequeña y tardía; mediada la estación, los Wright concibieron la idea de convertir la aleta fija en un timón de dirección que se deflectaría al alabear las alas, ayudando a iniciar el viraje. Al efectuar este cambio, la doble superficie se transformó en una superficie simple. En esta situación, los Wright habían situado por primera vez todas las superficies de mando necesarias para el control completo alrededor de los tres ejes. Esta configuración se mantuvo hasta mediados de la

estación de 1905, en la que por fin separaron el control del timón de dirección del de alabeo del ala y obtuvieron los tres controles independientes que todos los aviones han tenido desde entonces.

Después de la estación de 1902 los Wright sabían que estaban preparados para construir una avión motopropulsado. Diseñaron su avión de 1903 siguiendo las mismas líneas generales que el planeador de 1902, con una envergadura de 12,2 metros, una cuerda de 1,98 metros y con una superficie alar de 47,38 metros cuadrados, para soportar el peso adicional de la planta de potencia y del sistema propulsor. Tras haber buscado en vano un motor entre los fabricantes de automóviles, diseñaron y construyeron su propio motor de 4 cilindros horizontales en línea. Pesaba alrededor de 90 kilogramos, incluyendo los sistemas auxiliares de combustible y refrigeración, y desarrollaba de 12 a 13 caballos de potencia.

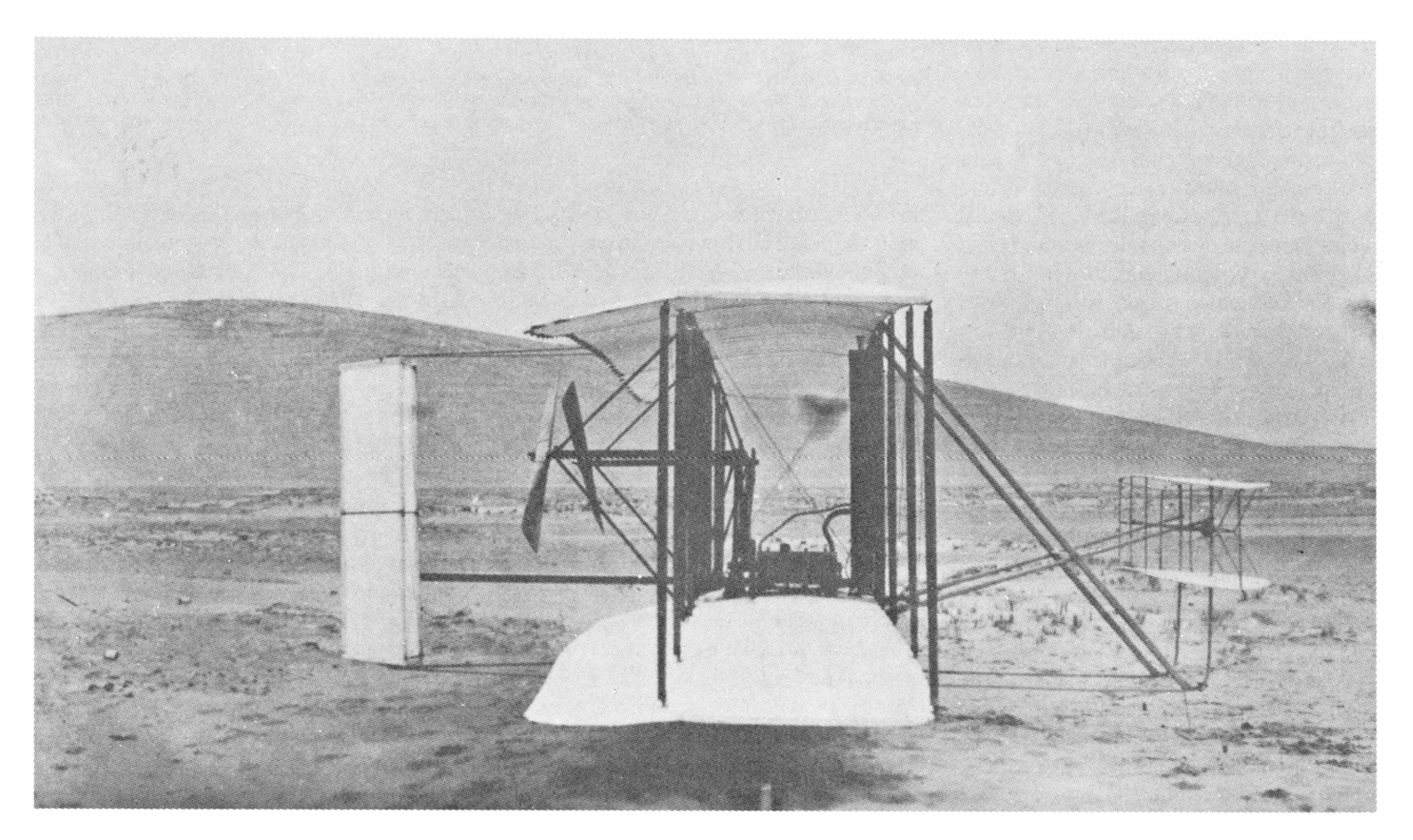
En algunos aspectos el desarrollo de las hélices del avión fue el logro más notable de los Wright. Efectuaron por primera vez un análisis teórico del elemento de pala de la hélice y produjeron las primeras hélices eficientes fabricadas para actuar en el aire. Cómo consiguieron esto, es un secreto de los diálogos no registrados entre los dos hermanos, pero las cifras se conservan. Las hélices tenían un rendimiento de alrededor del 70 por ciento, cifra que acreditaría a cualquier proyectista moderno en las mismas circunstancias. Eran hélices propulsoras, grandes (2,44 metros de diámetro), que giraban lentamente (380 revoluciones por minuto) y actuadas en direcciones de rotación opuestas mediante cadenas de bicicleta. De esta manera cancelaron cualquier par de reacción que podría haber complicado el control lateral.

Mientras los Wright estaban montando el avión de 1903 en Kitty Hawk se tomaron tiempo, hacia finales de año, para realizar muchos vuelos en el planeador de 1902. Se convirtieron en expertos en planeo, y ambos hermanos superaron un minuto de vuelo, antes de que terminase la estación: Orville planeó 71,75 segundos y Wilbur 69,25 segundos. Estos fueron los nuevos récords de permanencia en vuelo.

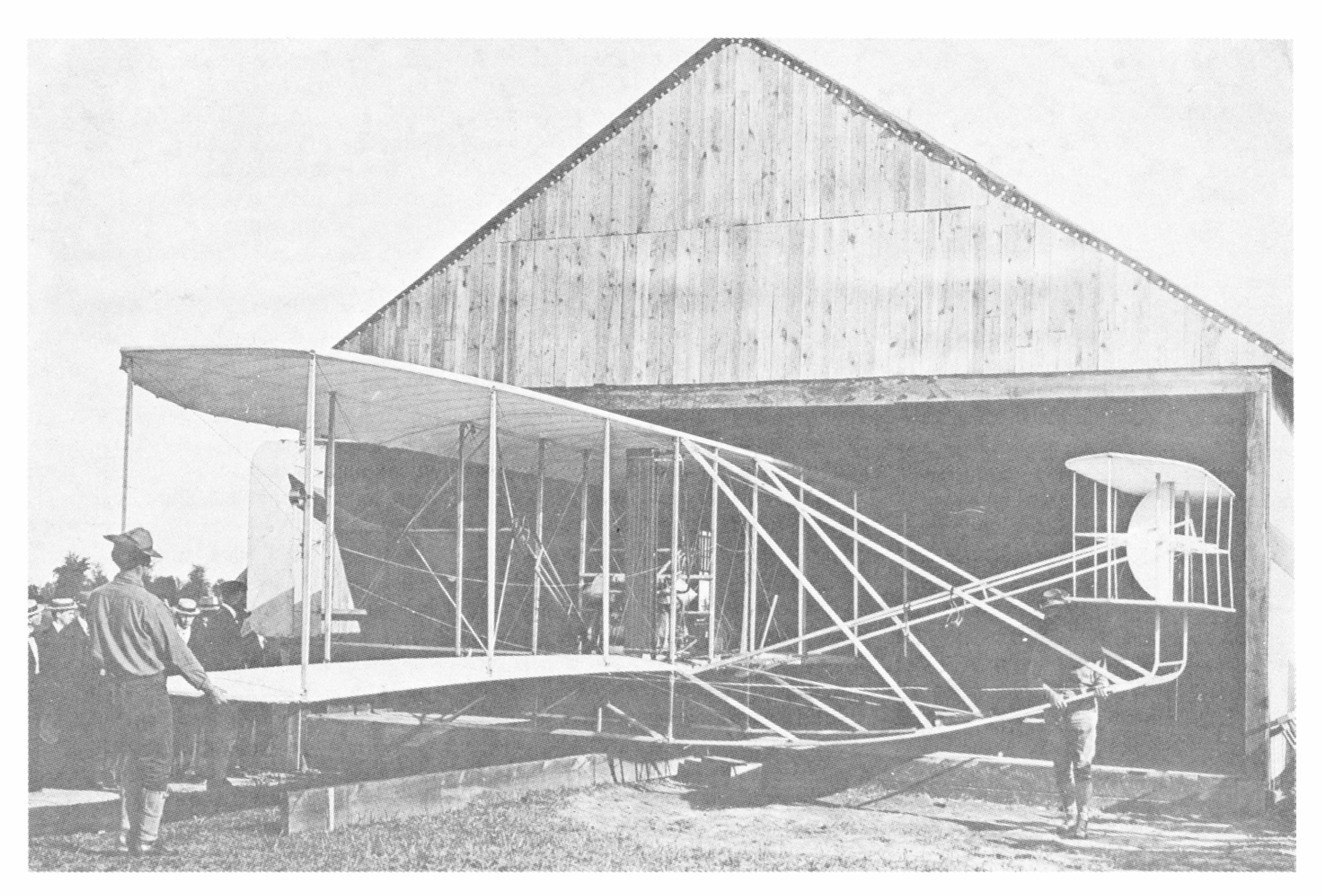
Tras una desalentadora serie de problemas con el sistema de propulsión, el avión estuvo listo el 14 de diciembre. Wilbur, que acertó la cara que saldría de una moneda arrojada al aire, fue el piloto. La nueva máquina resultó inesperadamente difícil de controlar en cabeceo. Inmediatamente después del despegue se precipitó contra el suelo rompiendo el timón de profundidad, terminando así los vuelos por ese día.

Decididos a pasar las Navidades en casa, a pesar de un viento racheado de más de 30 kilómetros por hora, los Wright lanzaron el avión de nuevo el 17 de diciembre, esta vez con Orville en los controles. La máquina era inestable, tendiendo a oscilar hacia arriba y hacia abajo. Esta situación estaba agravada por los vientos racheados y por un timón de profundidad que tendía a deflectarse hasta sus posiciones extremas. Teniendo que acostumbrarse a nuevos y difíciles controles frente a viento racheado, Orville salió bien de la prueba al permanecer en el aire doce segundos, durante los cuales recorrió solamente 36 metros. Cada hermano efectuó dos vuelos ese día, y en el último de ellos Wilbur permaneció en el aire 59 segundos, recorriendo 259 metros. Este vuelo terminó con una caída que dañó nuevamente la estructura del timón de profundidad anterior y puso fin a los vuelos por ese día. Mientras los hermanos estaban al lado del avión discutiendo los vuelos, el viento lo volcó y lo destruyó. Este avión nunca volvió a volar.

Con potencia, los Wright no necesitaban ya Kitty Hawk, y en 1904 dispusieron volar su máquina en la finca de su amigo Torrence Huffman, cerca de su hogar en Dayton. Comenzaron construyendo dos nuevas máquinas en esa primavera que, en esencia, eran duplicados del



AVION DE 1903, primera máquina motopropulsada de los Wright; se muestra aquí de perfil tras su montaje final en Kitty Hawk. Se ha sustituido el timón de profundidad simple anterior del planeador de 1902 por un timón de profundidad doble y el timón de dirección simple por un timón de dirección doble. Se aumentó la superficie alar para acomodar el peso del motor, del sistema de refrigeración y de las hélices. Obsérvese bien que las alas se hallan montadas con diedro negativo.



AVION DE 1908 tipo A de los Wright, sometido a inspección por oficiales del Ministerio de Defensa. La superficie vertical semilunar entre los timones de profundidad es una de las dos que los Wright añadieron por primera vez a su avión de 1905 para mejorar el equilibrio del eje de guiñada. Tanto el timón de profundidad anterior como el timón de dirección posterior estaban montados más alejados de las alas que en 1903-4; el cambio mejoró la controlabilidad.

avión de 1903. Una de ellas se convirtió en el avión de 1904 y la otra en el de 1905. También construyeron un nuevo motor, más potente, que desarrollaba 16 caballos de potencia al principio de la temporada de 1904. Su potencia aumentó durante el rodaje y, al final de la estación de 1905, haciéndolo funcionar a una velocidad algo más elevada, desarrolló 20 caballos.

La reducida superficie de la granja de Huffman exigía a los Wright realizar viajes más cerrados que los que habían estado efectuando en Kitty Hawk con planeadores, y ello constituyó un nuevo problema. Por fin, aprendieron a manejar los controles de forma que podían realizar virajes en un espacio más bien reducido, pero entonces apareció otra dificultad que les intrigó. A menudo la máquina perdía el control y resbalaba lateralmente hasta el suelo. Esta condición, a la que llamaré pérdida en el viraje, era aún una incógnita al final de la estación de 1904.

La máquina compartía también la tendencia de sus predecesoras a fluctuar en cabeceo, tal como Wilbur lo expresa. Se reconstruyó en julio de 1904. El motor, los depósitos de combustible y el radiador se cambiaron de posición, de forma que el centro de gravedad se desplazase 7,3 centímetros hacia atrás. Sin embargo, la máquina resultó entonces tan inestable, que prácticamente no podía volarse. En lugar de reconstruirla otra vez para desplazar su centro de gravedad hacia adelante, los Wright la lastraron con 31,79 kilogramos de hierro en la estructura del estabilizador horizontal anterior, avanzando así el centro de gravedad 20 centímetros, o sea 12,7 centímetros por delante de donde había estado anteriormente. Aunque la máquina seguía oscilando tenía mejores cualidades de vuelo. Terminó la estación en esta condición y se prescindió de ella, rescatando el motor y el sistema de propulsión.

El avión de 1905 comenzó su vida casi igual que el modelo de 1904, con la siguiente salvedad: a la estructura del estabilizador horizontal se le añadieron unas pequeñas superficies verticales, con objeto de disminuir la tendencia de la máquina a virar en un resbalamiento o en viento lateral. Voló en forma semejante a su predecesor con la misma tendencia a oscilar. Su inestabilidad dio lugar, en julio, a un accidente en el cual Orville resultó milagrosamente ileso. Se reconstruyó luego con un timón de profundidad mayor, situado a una mayor distancia desde las alas, lo que más que duplicó la eficiencia de control. Mientras tanto, se había comprobado que las alas con diedro negativo de la máquina de 1903 eran innecesarias en los aviones motopropulsados y desaparecieron a principios de 1904. La máquina de 1905 estaba montada con un ligero diedro que produjo, por primera vez, un pequeño grado de estabilidad lateral. Conforme avanzaba la estación, se aumentó el tamaño del timón de dirección, se desplazó más hacia fuera y, finalmente, se hizo independiente del control lateral. Lastraron la máquina con 12,7 kilogramos de hierro a fin de avanzar otros diez centímetros el centro de gravedad.

Con el timón de profundidad modificado comenzó el vuelo real, y al adquirir una mayor experiencia en él, los Wright descubrieron que el problema del viraje en pérdida podía resolverse bajando el morro del avión a fin de adquirir un poco de velocidad adicional para el viraje. Descubrieron asimismo que la fuerza centrífuga sumada al peso exigía más velocidad y po-

tencia del avión que en vuelo rectilíneo. Los vuelos finales aumentaron en longitud, el más largo de ellos duró 38 minutos y cubrió 55 kilómetros. Este único vuelo de octubre de 1905 representó más tiempo de permanencia en el aire que el total de 104 vuelos del avión de 1904. Los Wright supieron entonces que estaban en condiciones de presentar su máquina en el mercado. El avión de 1905 era la culminación de su desarrollo de los controles de vuelo. Se trataba del primer avión práctico del mundo y voló en forma rutinaria antes de que ninguna otra máquina más pesada que el aire dejase nunca el suelo.

Los Wright no volvieron a volar hasta 1908. Invirtieron el tiempo intermedio en buscar un mercado para su máquina, en desarrollar un nuevo motor más potente que produjo alrededor de 30 caballos y en construir un cierto número de nuevas máquinas que correspondían, en sus líneas fundamentales, al modelo de 1905. En 1908 montaron un nuevo motor en el avión de 1905 y efectuaron los primeros vuelos del mundo con dos personas a bordo. Por primera vez estaban sentados sobre el ala inferior en lugar de tendidos sobre la misma. Obtuvieron después sus bien conocidos triunfos de 1908 en Francia y Washington. Sin embargo, nunca progresaron más allá de su modelo de 1905, y hacia 1910 sus competidores los habían alcanzado.

Quedan algunas cuestiones por resolver respecto al control de cabeceo de los Wright. ¿Por qué insistieron en poner el estabilizador horizontal tipo "canard" en los aviones motopropulsados? ¿Estaban preocupados aún por el picado que podía seguir a la pérdida? ¿O se trató simplemente de que no quisieron cambiar de caballo a mitad de carrera? ¿Por qué tuvieron muchos más problemas con la estabilidad y control de cabeceo de sus aviones motopropulsados de la que habían tenido con sus planeadores? ¿Por qué cometieron el error, poco propio de ellos, de desplazar hacia atrás el centro de gravedad de la máquina de 1904 cuando debieran haberlo adelantado?

Buscando respuestas a estas preguntas descubrí que nunca se había efectuado un estudio de las características de cabeceo y de control de los primitivos aviones tipo "canard" de los Wright. En la escuela Thayer de Ingeniería del Dartmouth College acometí yo mismo ese estudio, determinando la estabilidad estática de dichos aviones a partir de los datos aerodinámicos existentes, de las notas de los Wright y de mediciones efectuadas en el avión de 1905 que aún existe. Después, analicé la estabilidad dinámica de las máquinas simulando su vuelo mediante ordenador.

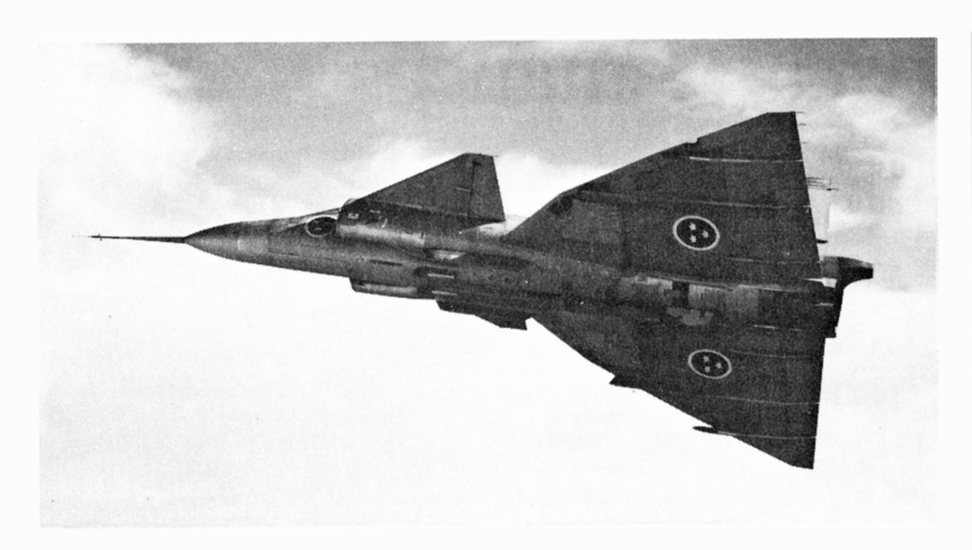
He descubierto que, tal como volaron, los aviones eran realmente inestables, pero que su inestabilidad disminuye al adelantar el centro de gravedad. Cada máquina tiene una cierta posición de dicho punto que marca la divisoria entre estabilidad e inestabilidad, y existe un margen de posiciones por delante de la misma, dentro del cual resulta posible el vuelo estable. Cuando el centro de gravedad se desplaza hacia adelante, el estabilizador tiene que soportar una mayor parte del peso. En las máquinas de 1903 y 1904, con sus pequeños estabilizadores, queda entonces poco margen de sustentación del estabilizador utilizable para control. Por tanto, el margen de vuelo estable es sólo de interés académico.

La tabla de la izquierda indica la posición del centro de gravedad de todos los aviones "canard" de los Wright, incluyendo al monoplano construido en 1909 para el Army Signal Corps. También indica la posición de la línea divisoria entre la estabilidad e inestabilidad. Se puede ver en la tabla que, en la evolución de sus máquinas, los Wright se acercaron gradualmente a la estabilidad en cabeceo, hasta que por fin alcanzaron un punto en el cual la inestabilidad puede compensarse fácilmente mediante el control disponible. No continuaron más allá de este punto.

Al reconstruir el vuelo de las máquinas, he simulado los aviones de 1905, 1908 y 1909 en sus modos estables, con una posición del centro de gravedad por delante de la que tuvo realmente en el avión real. La simulación muestra que hubiese sido perfectamente factible volar las máquinas con comportamiento estable y bien amortiguado con timón de profundidad fijo. De hecho se hubiese podido despegar, volar y aterrizar con los aviones sin tocar el timón de profundidad; el aterrizaje pudo haberse efectuado cortando el motor y permitiendo a la máquina planear hasta el suelo. Sin embargo, cuando se deja libre el timón de profundidad para operación convencional, el comportamiento del avión se deteriora. Cualquier intento de volarlo en ángulo de ataque elevado da lugar a un tipo especial de pérdida en el cual el timón de profundidad, al actuar a un ángulo de ataque más elevado

AVION	PESO CARGADO (KILOGRAMOS)	CENTRO DE GRAVEDAD (PORCENTAJE DE CUERDA)	UMBRAL DE ESTABILIDAD (PORCENTAJE DE LA CUERDA)	NOTAS
1903	340	30,8	23	SOLO EFECTUO CUATRO VUELOS
1904	377	31,2	23	
1904	377	35,0	23	RECONSTRUIDO PARA RETRASAR 7,6 CMTS EL CENTRO DE GRAVEDAD
1904	407	26,3	23	SE LASTRO CON 32 KG LA ESTRUCTURA DEL TIMON DE PROFUNDIDAD
1905	409	31,9	23	
1905	407	18,8	8	RECONSTRUIDO PARA AUMENTAR Y EXTENDER EL TIMON DE PROFUNDIDAD
1905	406	12,8	8	SE LASTRO CON 12,7 KG LA ESTRUCTURA DEL TIMON DE PROFUNDIDAD
1908	420*	20,3	13	
1908	543**	18,3	13	
1909	402*	20,7	5	
1909	470**	18,6	5	
1909	410*	17,0	5	SE LASTRO CON 8,2 KG. LA ESTRUCTURA DEL TIMON DE PROFUNDIDAD
1909	478**	15,3	5	

MODELOS SUCESIVOS de los Wright mostraron variaciones en dos parámetros de estabilidad de cabeceo. Un parámetro es la posición del centro de gravedad expresada aquí en porcentaje de la cuerda, esto es, la distancia por detrás del borde del ataque. El otro criterio es el umbral de estabilidad, una función de las áreas relativas de ala y estabilizador multiplicada por la distancia entre ambas. Este se expresa también en porcentaje de la cuerda. Cuando el centro de gravedad está por delante del umbral de estabilidad (una condición nunca alcanzada por los aviones Wright), el avión es estable en su margen normal de vuelo. Cuando no está por delante, la inestabilidad aumenta en proporción al aumento de distancia entre el centro de gravedad y el umbral de estabilidad. Los Wright prefirieron la controlabilidad a la estabilidad, aunque utilizaron lastre para reducir la separación. Un asterisco indica que había una persona a bordo de la máquina; dos asteriscos, que se encontraban dos personas.



AVION MODERNO con estabilizador horizontal por delante del ala. Se trata del Viggen sueco, avión de despegue y aterrizaje corto con velocidad de vuelo superior a 2 mach. Esta configuración se reconoce por "canard".

que el ala, entra en pérdida y se desploma conduciendo al avión a un picado semejante al de la pérdida normal, pero de duración más corta y con recuperación más rápida. Esto demuestra que si el "canard" se hace estable desplazando peso hacia adelante, ya no sirve para proteger contra el picado que sigue a la pérdida. Por tanto, mientras los Wright usaron el "canard", actuaron correctamente al permanecer dentro del margen inestable. He llegado a la conclusión, además, de que en vista de los problemas continuos que tuvieron con el comportamiento en pérdida del avión durante el período de desarrollo 1903-1905, actuaron con buen criterio al mantener la configuración "canard", con su protección inherente contra el picado que sigue a la pérdida. Si no hubiese sido por el timón de profundidad anterior, los numerosos episodios de pérdida en viraje podrían haber conducido a picados fatales después de la misma.

Para simular el comportamiento de la máquina en sus modos inestables, se ha programado un piloto automático para que realice las maniobras necesarias de compensación con el timón de profundidad. Los vuelos reales de la máquina de 1903 pueden simularse con realismo convincente añadiendo ráfagas aleatorias al programa de vuelo. He podido imaginarme a mí mismo en la situación de Orville cuando la máquina oscila en respuesta a las ráfagas y cuando manipula el timón de profundidad para mantener el avión en vuelo tan horizontal como sea posible. El vuelo simulado termina cuando la máquina se precipita contra el suelo, igual que ocurrió con el prototipo en 1903, y dura entre 7 y 70 segundos. Los cuatro vuelos reales duraron de 11,5 a 59 segundos.

¿Por qué las máquinas motopropulsadas presentaron problemas inesperados de control de cabeceo? He llegado a la conclusión de que los Wright se despreocuparon a causa de la relativa estabilidad de sus planeadores, olvidando el comportamiento inestable de la máquina de 1901 con su gran curvatura inicial. Todos los planeadores tuvieron una curvatura moderada que se hizo más pequeña conforme iba avanzando la estación y las costillas de las alas se deformaban por sí mismas. Se ha visto que la máquina de 1901 era positivamente estable a causa de la forma en que se aplanó el ala al reconstruirla. Los aviones motopropulsados llevaban alas con mayor curvatura que los planeadores, y eran más pesados y rápidos que éstos. Requerían una mano firme y un control más potente, que no tuvieron hasta que se aumentó el tamaño del timón de profundidad del avión en 1905.

¿Por qué cometieron los Wright la torpeza de desplazar hacia atrás el centro de gravedad en la máquina de 1904? Está claro que estaban preocupados con los complejos problemas de balance-guiñada y que nunca concedieron el beneficio de su agudo análisis al asunto del control de cabeceo. Yo creo que esto se debía en parte a que les tranquilizó el dócil comportamiento de los planeadores.

De hecho, puede decirse que a partir de 1903 los Wright dejaron de ser agudos científicos analistas y se transformaron en afanosos constructores. Tras su triunfo de 1903 no existen ya más ejemplos de sus grandes dotes analíticas. Nunca volvieron a recuperar su primitiva capacidad científica o innovadora, y hacia 1912 habían sido ya claramente superados por sus competidores. Wilbur falleció ese año, y la maravillosa simbiosis de los hermanos murió con él. Hubiese ocurrido lo mismo de haber fallecido Orville. Habían hecho bastante.

Juegos matemáticos

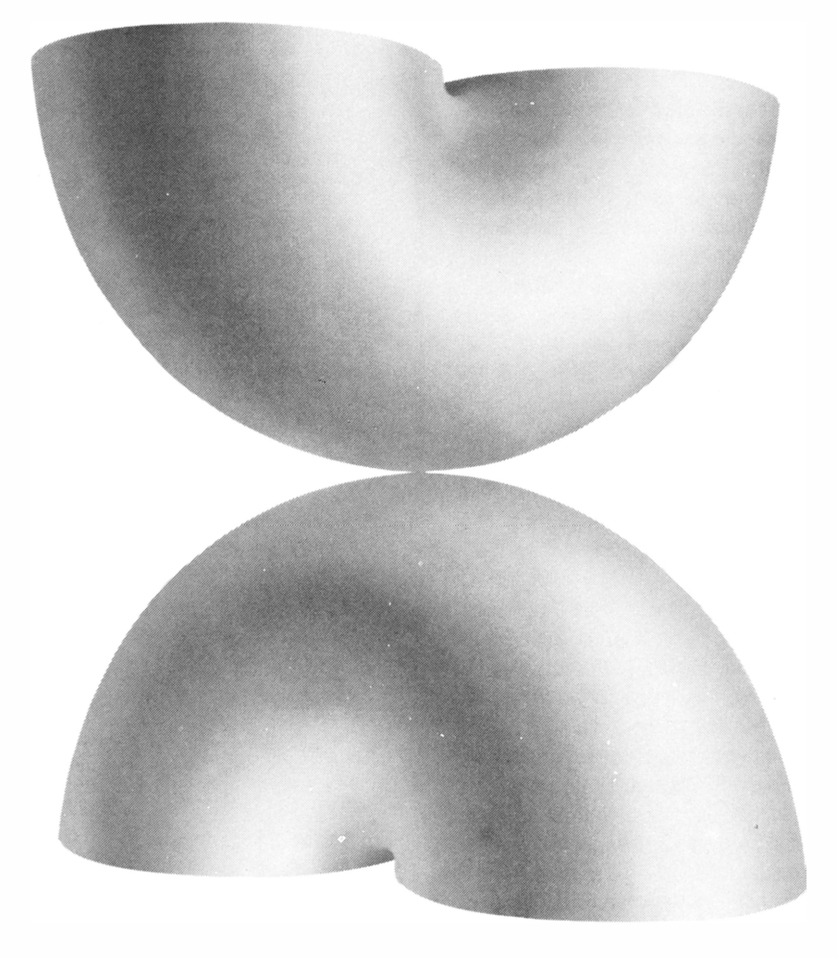
Se aplican al moderno arte minimal conceptos de estética matemática

Martin Gardner

"Simplicidad, ése es su principal mérito. Simplicidad tan pura, tan profunda, en una palabra, tan *simple*, que ninguna otra palabra podría describirlo adecuadamente".

—Lewis Carroll, *The New Belfry of Christ Church, Oxford*

El arte moderno, y particularmente en los Estados Unidos, se encuentra en tan caótica situación que casi todas sus formas —buena o mala, tradicional o vanguardista, seria o lúdica— son hoy expuestas, criticadas, alabadas, condenadas, e incluso compradas. En pintura, por razones sobre las que los críticos siguen disputando, existe un fuerte movimiento hacia el realismo; pero en escultura casi todo el movimiento parece llevar dirección contraria. ¡No es que el realismo haya dejado de invadir también el mundo del arte tridimensional! Hace unos 15 años, George Segal comenzó a realizar modelos vaciados en escayola de figuras humanas, que al principio pintaba completamente de blanco y, más adelante, de vivos colores. En nuestros días, Duane E. Hanson ha llevado la escultura realista a sus últimas consecuencias, creando modelos de cera de tamaño natural de hombres y mujeres, que son analogía tridimensional de la fotografía en color. Sin embargo, la tendencia principal, al menos en lo relativo a las esculturas al aire libre que podemos ver en parques y edificios públicos, se dirige a la forma de arte abstracto, no figurativo, llamado escultura minimal.



Dibujo de **Construcción a partir de un anillo circular**, *de Max Bill*

La escultura minimal es escultura reducida a formas abstractas y extremadamente simples. El arte con chatarra puede ser minimal en costo de materiales, pero sus formas suelen ser demasiado complejas. Un madero varado en la playa, arrastrado por la corriente, puede dar una obra de arte, minimal en cuanto al esfuerzo del artista, pero también demasiado complejo para poder calificarse de arte minimal. No; el auténtico arte minimal —esas formas geométricas que hoy vemos en lugares públicos— sugiere, en palabras de Hilton Kramer, de *The New York Times*, "la atmósfera de la línea de montaje, del laboratorio de proyecto, de la mesa de diseño, de la fábrica de plásticos". A la lista de Kramer me gustaría añadir: las ilustraciones de los libros de matemáticas, y en particular, de los dedicados a geometría recreativa con cuerpos sólidos. Este mes echaremos una ojeada a algunas zonas de superposición de los juegos geométricos con la escultura minimal.

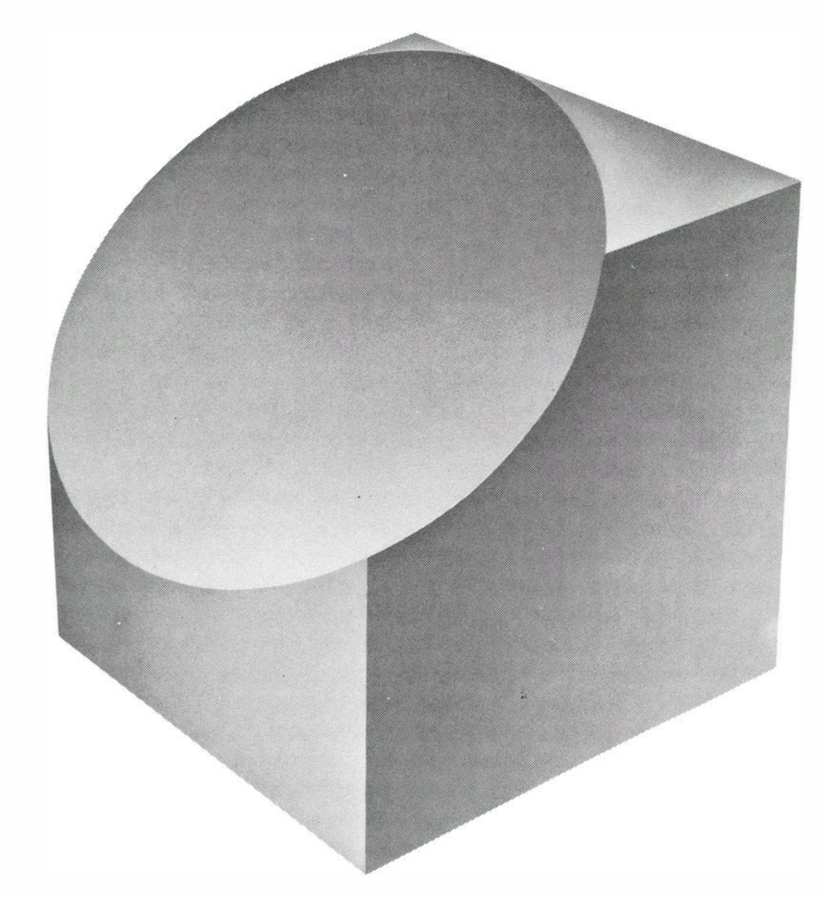
Comenzaremos con la técnica minimal consistente en cortar y plegar láminas metálicas, y quizá, pintarlas después. Un sorprendente ejemplo de este género es la escultura de Picasso, de casi 20 metros de altura y color óxido de hierro, plantada en la plaza del Centro Cívico de Chicago. Realizada en un principio como recortable en cartulina, no es auténticamente minimal porque tiene dos pupilas (aunque sólo un ojo) y lo que parecen ser dos orificios nasales. El *Busto de Silvia*, que se yergue 10 metros en Bleecker Street, en Nueva York, es más claramente un rostro de mujer, a pesar de haber sido modelado como recortable. Escultores minimalistas de todo el mundo han ejecutado con esta técnica obras totalmente abstractas de todos los tipos y colores.

La ilustración superior de la página siguiente muestra un proyecto de monumento público perteneciente a esta misma categoría. Estúdiela cuidadosamente. ¿Sería posible construir un modelo de esta misma forma utilizando una tarjeta ordinaria de fichero, dándole unos cuantos tijeretazos y pliegues, o será necesario usar cola para pegar bordes? No conozco el origen de este maravilloso problema, que pone a prueba la propia capacidad para pensar en tres dimensiones. Tuve noticia de él a través de Kim Iles, profesor de Silvicultura en la Universidad de Columbia Británica. A su vez, él se enteró por un profesor ruso de esa especialidad, quien lo vio propuesto en un examen de ingreso en la escuela de arquitectura de la Universidad de Leningrado.

Esta figura ha llegado a llamarse hipercarta. Los ilusionistas han sabido de su existencia y la han convertido en fundamento de cierto número de trucos. (Véase el artículo "Hypercard" de Karl Fulves, en el primer número de *The Chronicles*, nueva revista de magia, editada por Fulves, que puede adquirirse en tiendas de artículos de ilusionismo.) La hipercarta sirve también para plantear un divertido juego de salón. Se coloca en el centro de la sala un modelo grande de esta figura. Los jugadores pueden examinarla desde cualquier posición, pero no se les permite tocarla. Se le da a cada jugador una ficha de cartulina y unas tijeras, y se estipula un premio para el primero que consiga reproducirla. Es sorprendente el número de personas que acaban convencidos de que tal tarea es imposible.

Otra técnica en boga de creación de esculturas minimales consiste, simplemente, en construir un modelo a gran escala de un poliedro. Entre las obras recientes de este estilo, la más conocida es *Cigarette*, un prisma poliédrico negro, enorme y retorcido, diseñado por el escultor minimalista Tony Smith, de South Orange, N. J. Hay una caricatura de David Levine (*New York Review of Books*, 26 de septiembre de 1968) que muestra a María, de la *Pietà* de Michelangelo, sosteniendo en el regazo la forma fláccida de un poliedro que recuerda sospechosamente al *Cigarette* de Smith.

Ciertos escultores minimalistas gustan de reproducir cubos ordinarios, aunque, por lo general, sus modelos estén pintados a pistola y tengan un vértice truncado, no sea que alguien pueda pensar que se trata del pedestal de alguna futura obra. Muchos más prefieren trabajar con cierto número de cubos adosados por sus caras. Los lectores habituales de esta sección habrán reconocido inmediatamente tales formas, llamadas policubos. He pensado muchas veces que el cubo llamado Soma, de Piet Hein, formado por seis tetracubos y un tricubo, sería una pieza fascinante de escultura minimal a cielo abierto. Cada mes podría modificarse su forma poligonal general, aunque las piezas deberían poder trabarse de algún modo en previsión de robos.

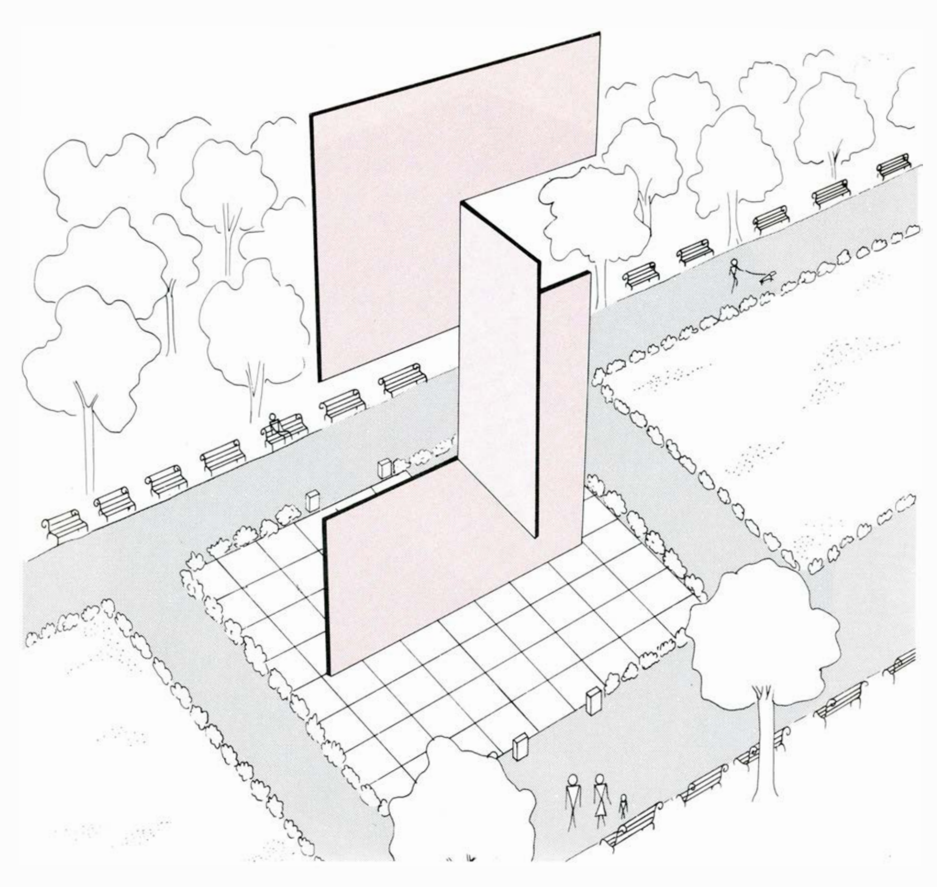


Escultura minimal de Mitsumasa Anno

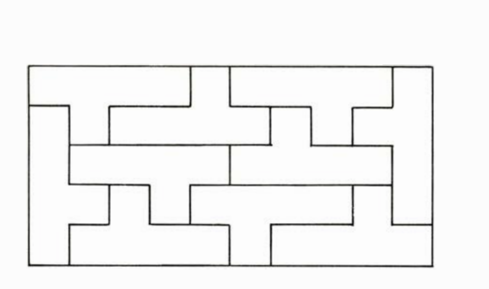
Un policubo formado por ocho cubos dispuestos en paralelepípedo rectangular (ortoedro) de 1-por-2-por-4 se denomina ladrillo canónico. En febrero de 1976 me ocupé, en *Scientific American*, de empaquetamientos de ladrillos canónicos en cajas. Que yo sepa, el primer escultor que ha utilizado ladrillos canónicos en una obra de arte ha sido el minimalista neoyorkino Carl Andre. En 1976, la Tate Gallery de Londres exhibió una obra de Andre, formada por 120 ladrillos ordinarios (que no son exactamente canónicos, pero casi) apilados en un paralelepípedo rectangular de dos ladrillos de altura, seis de anchura y 10 de longitud. Andre no sólo envió los ladrillos a la Tate, sino que incluyó también las "instrucciones" de ensamblaje. La mayor parte de los visitantes estimaron que la obra no era sino un "montón de ladrillos" y los periódicos londinenses tuvieron una jornada antológica el día que se hizo público que la Tate Gallery había abonado a Andre 12.000 dólares por su obra. John Russell, de *The New York Times*, defendió la escultura por su "orden, determinación,... y absoluta simplicidad", por su "claridad de intención" y por la "manera franca e inambigua con que se han ensamblado sus materiales". Un Andre, dijo Russell, "se limita a permanecer donde está, ocupado en sus propios asuntos".

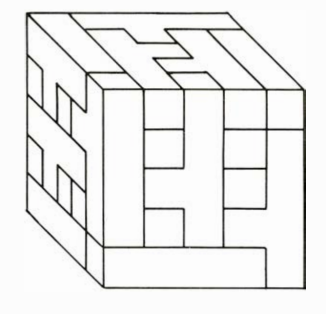
No obstante, para los matemáticos, la pila de ladrillos de Andre carece por completo de interés, pues ellos han sabido concebir toda clase de empaquetamientos poliédricos que son estéticamente igual de agradables, cuando menos, y que poseen la ventaja de ser interesantes. Consideremos, por ejemplo, la forma tridimensional del pentomino plano *Y*. El rectángulo de mínima superficie (5 por 10) que puede construirse con pentominos *Y* se muestra en la ilustración central de la página siguiente. Cuando al pentomino se le da grosor unidad, con lo que será el sólido resultante de unir cinco cubos, se le llama pentacubo *Y*. ¿Cómo son las cajas rectangulares que pueden rellenarse completamente (sin dejar huecos) utilizando pentacubos *Y*?

Para poderse rellenar completamente, es obvio que el volumen de la caja ha de ser, expresado en cubos unitarios, múltiplo de 5. No existe ninguna caja completa-

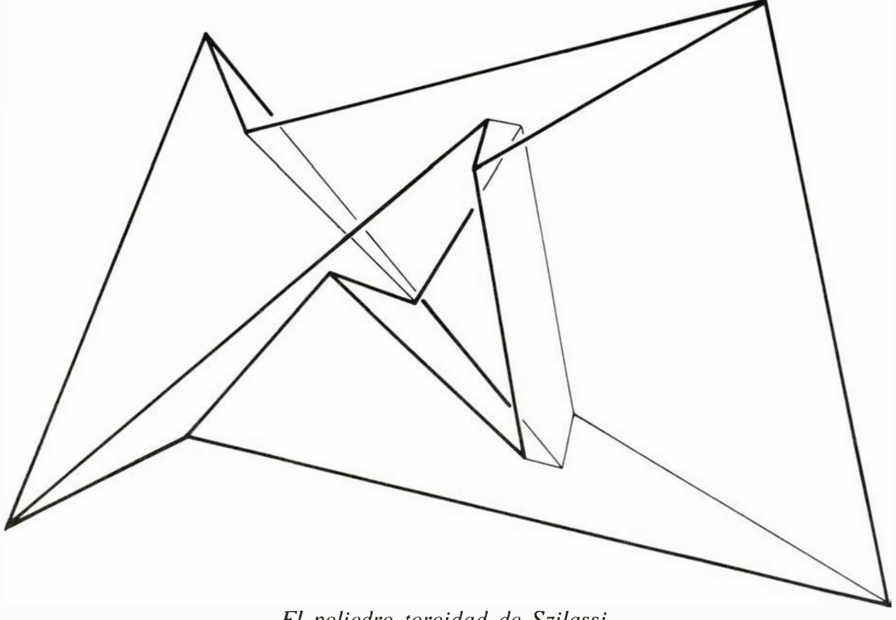


Diseño de un monumento de escultura minimal





Pentominos Y **(izquierda)** *y pentacubos* Y **(derecha)**



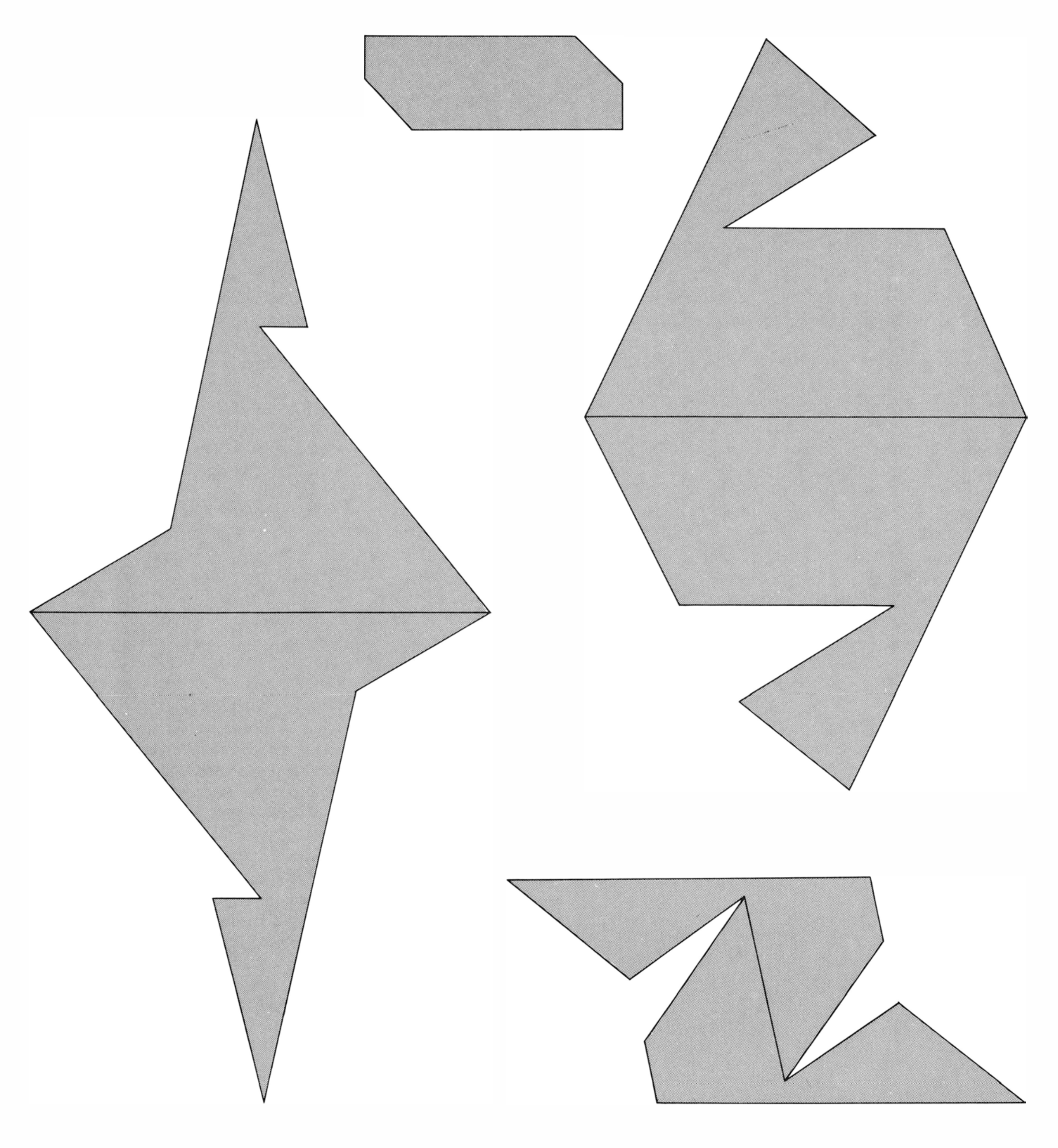
El poliedro toroidad de Szilassi

mente rellenable de volumen $5p$ en la que el número p de pentacubos Y utilizados sea primo. En 1970, C. J. Bouwkamp y David A. Klarner reseñaron los resultados de un programa de ordenador que halló todas las cajas completamente rellenables con 25 pentacubos *Y*, o menos. La más pequeña de todas ellas es la caja de 1-por-5-por-10. En la parte izquierda de la ilustración central de esta misma página se muestra uno de los cuatro posibles métodos de empaquetamiento. Existen otras tres cajas de este mismo volumen, pero ninguna de ellas resulta ser rellenable.

La mínima caja cúbica, que es al mismo tiempo la única caja de volumen 125 que puede rellenarse con los pentacubos *Y*, es el cubo de 5 por 5 por 5. Si el lector se toma la molestia de construir 25 pentacubos descubrirá que componer con ellos un cubo resulta ser formidable y espléndido rompecabezas. La solución parcialmente dada en la parte derecha de la ilustración central de esta misma página fue descubierta a mano por Klarner antes de que su programa de computador imprimiese varios cientos más de otras soluciones. Si el trabajo de Andre para la Tate Gallery hubiese sido un cubo formado por 25 pentacubos *Y* en lugar de un paralelepípedo rectangular de 120 octacubos, hubiera requerido un sistema de instrucciones mucho más complejo y detallado, pero a cambio hubiera interesado e intrigado a los matemáticos.

Lewis Carroll se cuenta entre los muchos que han encontrado que el cubo ordinario es demasiado sencillo para poseer gran valor estético; pero nadie ha sido más incisivo y ocurrente que él al comentar críticamente tal tipo de arte. En 1872 se diseñó un nuevo campanario para alojar las campanas trasladadas de la catedral de Christ Church, en Oxford, donde Charles L. Dodgson enseñaba matemáticas. El campanario, situado sobre una elegante escalinata que conducía al paraninfo situado en un ángulo del Gran Cuadrilátero, no era más que un gran cubo de madera. Su diseño molestó tanto a Dodgson que éste llegó a publicar a su cargo una monografía dedicada a esta cuestión, titulada *The New Belfry of Christ Church, Oxford* (El nuevo campanario de Christ Church, Oxford). El título va acompañado de un verso de Keats: "Una cosa bella es alegría perenne". Bajo la cita, Dodgson dibujó un cuadrado, al que puso el siguiente pie: "Lado Este del nuevo campanario, Ch. Ch., visto desde el Prado".

Dodgson abre su monografía con una nota etimológica. La palabra *belfry*, escribe, procede del francés *bel*, que en inglés significa "beautiful, becoming, meet", y del alemán *frei*, "free, unfettered, secure,



Patrones de las caras del poliedro de Szilassi

safe". Por consiguiente puede considerarse como equivalente a "meat-safe" (fresquera, especialmente para carne; juego de palabras basado en la equivalencia fonética de "meet" y "meat", y, por tanto, imposible de traducir) objeto con el cual el campanario guarda semejanza perfecta. Dodgson especula también sobre los motivos que indujeron a elegir tal diseño: Hay quienes dicen que fue sugerido por un estudiante de química, como modelo de cristal, pero otros afirman que un profesor de matemáticas encontró el diseño en el undécimo libro de Euclides. La pura realidad, dice Dodgson, es que el campanario fue diseñado por un arquitecto excéntrico, actualmente recluido en una institución de salud mental, quien se inspiró en una caja de té.

Para conseguir una perspectiva óptima del campanario, Dodgson recomienda mirarlo desde un vértice, con lo que se podrán ver las aristas del cubo convergiendo en perspectiva hacia un punto de fuga. Tal imagen le sugiere gratas ideas: "Ojalá se encontrase *ya* en el punto de fuga". A continuación se debe dar lentamente la vuelta por el Cuadrilátero, "absorbiendo visiones de renovada belleza con cada paso", y alejarse después con paso mesu-

rado hasta que se experimente "la deliciosa sensación de alivio" al dejar de ser visible el campanario.

El airoso diseño del campanario, prosigue Dodgson, ha comenzado ya a inspirar a los fabricantes. Dos constructores de máquinas de baño de Ramsgate hacen actualmente sus máquinas con forma cúbica, y existe también una barra de jabón "cortada de la misma forma, tan simétrica y extraordinaria". Le han contado además que la Levadura Borwick y los Piensos Thorley no se expenden sino en envases de esta misma forma. El, por su parte, propone que en la próxima cena de fin de curso se le entregue a cada invitado "una reproducción portátil del campanario, primorosamente ejecutada en queso". Hay en la monografía de Carroll muchas otras cosas más, incluidos silogismos, un cuadro teatral de carácter cómico y parodias de pasajes de famosos poemas. La monografía completa, juntamente con el dibujo del campanario, del propio Dodgson, ha vuelto a imprimirse por Dover paperbacks, con el título *Diversions and Digressions of Lewis Carroll.* Una introducción explica ciertos chistes y alusiones para hacer más inteligible el texto.

Lajos Szilassi, matemático húngaro, descubrió el año pasado un notable poliedro que como obra de arte minimal sería mucho más interesante que el cubo. Se trata de un poliedro toroidal de siete caras, es decir, un cuerpo cuyas caras son todas poligonales y que es topológicamente equivalente a una rosquilla. Comparte con el tetraedro la extraordinaria propiedad de que todo par de caras tiene una arista común. Hasta que un programa de computador preparado por Szilassi descubrió esta estructura, ni siquiera se sabía que pudiera existir.

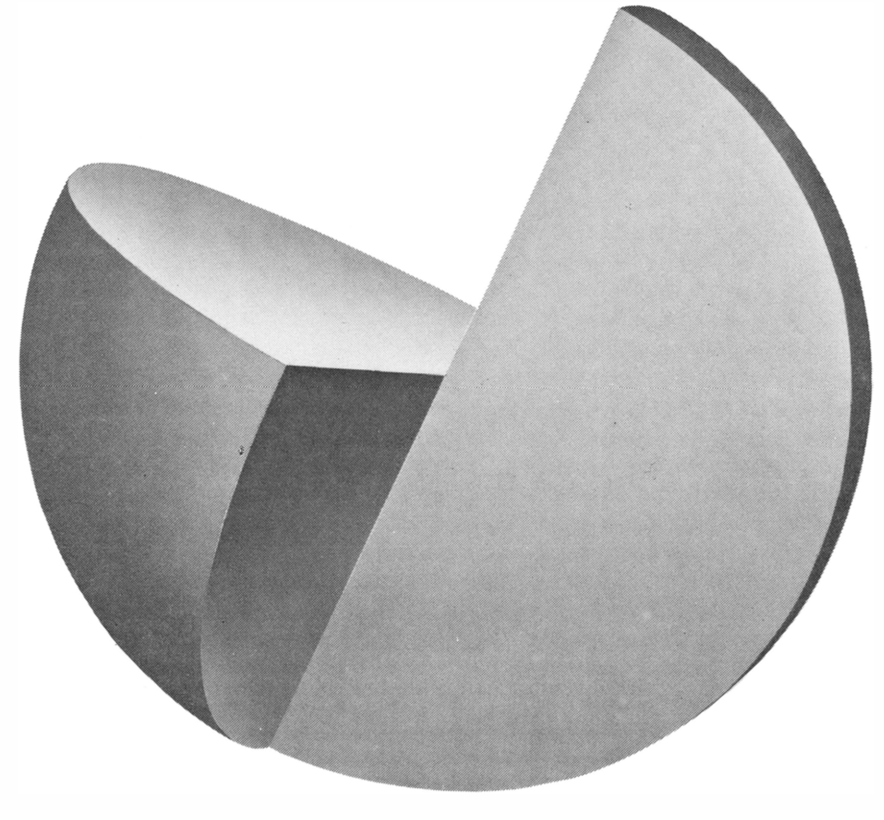
En mayo de 1975 describí en esta sección de *Scientific American* un poliedro de 14 caras, descubierto a finales de los años cuarenta por otro húngaro, Akos Császár. Los poliedros de Császár y Szilassi estan íntimamente relacionados. El poliedro de Császár es también toroidal, y comparte con el tetraedro la propiedad de no tener diagonales. El poliedro de Szilassi es dual topológico del de Császár: ambos tienen igual número de aristas (21), pero en el poliedro de Szilassi las caras del poliedro de Császár (14) han sido sustituidas por 14 vértices, y los siete vértices del poliedro de Császár, reemplazados por siete caras. La ilustración inferior que aparece en la página 98 muestra el aspecto del poliedro de Szilassi. Obsérvese que el agujero es inusitadamente grande y que hay tres pares de caras congruentes. Por si algún lector desea construirse un modelo del poliedro de Szilassi, E. N. Gilbert, de los Bell Laboratories, ha proporcionado los patrones de las siete caras, que se muestran en la ilustración de la página anterior. Cada par de caras congruentes puede cortarse de una pieza, y luego plegarse por la arista común.

El aspecto más delicioso del poliedro de Szilassi consiste en que da un método para trazar sobre un toro un mapa de siete colores, es decir, un mapa en el que no haya dos regiones adyacentes pintadas del mismo color. Sobre el plano, o sobre un sólido topológicamente equivalente a una esfera, el máximo número de regiones mutuamente adyacentes es cuatro, como ponen de manifiesto las caras del tetraedro. Sobre el toro, el correspondiente número cromático es siete. Pintemos cada cara del toroide de Szilassi de distinto color, e imaginemos luego que lo inflamos hasta que adquiere la forma de una rosquilla. La superficie del toro así obtenida estaría cubierta por un mapa de siete regiones que requeriría siete colores distintos.

La escultura minimal no se limita, como es obvio, a utilizar formas poliédricas. *El pájaro en el espacio*, de Constantin Brancusi, es conocido ejemplo de escultura minimal de formas libres. Otros muchos escultores han creado estructuras sencillas con líneas curvas que poseen interesantes propiedades matemáticas. En seguida se nos viene a la mente el colosal Gateway Arch, de Eero Saarinen, que domina el horizonte de St. Louis. Tiene forma de catenaria invertida, que es la curva que adoptaría una cadena al suspenderla por sus extremos.

Ningún artista de estos últimos cuarenta años ha sufrido tan fuerte influencia de nociones matemáticas como el suizo Max Bill, según muestran claramente su pintura, de aristas vivas, y su escultura minimal. La fascinación que la topología ejerce sobre Bill queda reflejada en docenas de obras, que exhiben superficies como la banda de Möbius, de una sola cara. Muchas de sus construcciones son extrañas, aunque singularmente gratas, descomposiciones de sólidos sencillos, como toros, esferas y cubos, en dos partes congruentes. Por ejemplo, en la obra que se muestra en la ilustración de la página 96, Bill cortó un toro de diorita negra en dos, colocando después en equilibrio una parte sobre la otra.

Bill ejecutó también una serie de cinco trabajos, cada uno de ellos basado en un método distinto de cortar una esfera en dos partes idénticas. Puede que Bill no se haya percatado de ello, pero una de estas obras, *Semiesfera centrada alrededor de dos ejes* realizada en granito gris, se basa en un antiguo método popular para cortar rápidamente una manzana en dos partes congruentes. En la ilustración de la izquierda se muestra una semiesfera cortada



La mitad de una esfera

según este método. No es tan sencillo de hacer como parece. Se da un corte vertical hasta la mitad del diámetro, por el centro de la mitad superior de la esfera. Se da media vuelta a la esfera y se realiza un segundo corte hasta la mitad, según un plano perpendicular al del corte anterior que pase por el centro de la mitad inferior de la esfera. Se dan ahora dos cortes horizontales que pasen por sectores diagonalmente opuestos del disco ecuatorial de la esfera. La media esfera que se muestra en esa ilustración de la página anterior es una de las dos mitades que resultan. Obsérvese que recuerdan una versión tridimensional de la bisección yin-yang de un círculo en dos mitades congruentes aunque asimétricas.

Terminaré por este mes con un maravilloso ejemplo de escultura minimal diseñado por Mitsumasa Anno, artista gráfico japonés. La ilustración de la página 97 muestra una obra tomada de su último libro, *Anno 1968-1977*. Una enorme versión de este misterioso cubo truncado, en mármol, sería muy indicado monumento para las soleadas tierras que rodean al California's Stanford Research Institute. Serviría para simbolizar la confianza de su junta rectora en las aplicaciones militares de las investigaciones que sobre clarividencia continúan realizando sus dos más famosos expertos en fenómenos parafísicos, los profesores Harold Puthoff y Russell Targ.

He aquí las soluciones a los problemas del último mes, referentes a fracciones egipcias:

1. La solución, única, es el desarrollo 1 = 1/2 + 1/3 + 1/6.
2. El desarrollo es 67/120 = 1/3 + + 1/8 + 1/10.
3. El desarrollo es 8/11 = 1/2 + 1/5 + + 1/37 + 1/4070.
4. El valor mínimo de *b* es 5. El algoritmo voraz nos proporciona el desarrollo siguiente 3/5 = 1/9 + 1/113 + 1/25.425, pero se tiene también el desarrollo 3/25 = 1/10 + 1/50.

Dije el mes pasado que la fecha de descubrimiento de las cinco formas de desarrollar 1 en suma de nueve fracciones egipcias con denominadores impares fue 1976. Sin Hitotumatu, quien traduce esta sección a la versión japonesa de *Scientific American* (en efecto, además de la versión española, existen la alemana, la francesa, la italiana y la japonesa), me envió un artículo de 1971 que da los cinco desarrollos. Estos resultados, más antiguos, se deben a S. Yamashita, uno de los más expertos programadores de sistemas de proceso de datos del Japón.

Taller y laboratorio

Experimentos, muy entretenidos, con Polyox, masilla casera y otros fluidos no newtonianos

Jearl Walker

La viscosidad mide la resistencia que se opone al movimiento de un fluido. La viscosidad del agua es bastante baja mientras que la de la miel y la del almíbar son mucho más elevadas. En la mayoría de los fluidos comunes la viscosidad sólo puede alterarse modificando su temperatura. La viscosidad en estos fluidos aumenta cuando baja la temperatura y decrece si ésta sube. A los fluidos de estas características se les llama newtonianos.

En otro tipo de fluidos, llamados no newtonianos, la viscosidad puede alterarse por otros medios, básicamente cizallando el fluido al agitarlo, verterlo o extenderlo. Muchos fluidos domésticos son de este tipo y su utilidad se debe en gran medida a su carácter no newtoniano. Este mes nos ocuparemos del comportamiento de tres tipos generales de fluidos no newtonianos.

En el primero de estos tipos de fluidos, la viscosidad se modifica bruscamente cuando se aplica al fluido una fuerza de cizalladura, volviendo la viscosidad a su valor inicial cuando cesa dicha fuerza. Si al cizallarlo se provoca un aumento de la viscosidad, se dice que el fluido es "dilatante". Algunos ejemplos comunes son: una disolución de almidón, las arenas movedizas, la arena húmeda de la playa, algunas tintas de imprimir y ciertas pinturas. Si al cizallarlo se consigue que la viscosidad disminuya, el líquido se llama "seudoplástico". La mahonesa y ciertas tintas y pinturas presentan este comportamiento. La ventaja de ser seudoplástico se hace más evidente en la tinta. Se quiere que la tinta fluya libremente por el extremo del bolígrafo (al ser cizallada) al ir escribiendo, pero no conviene que dicha tinta fluya, es decir, que se escape cuando el bolígrafo está en el bolsillo.

Cuanto más fuertemente se cizalla un fluido dilatante, mayor será su viscosidad, hasta llegar un punto en el que el fluido ofrece una tremenda resistencia al movimiento. Este tipo de comportamiento fue examinado por vez primera, y en detalle, por Osborne Reynolds en 1885 cuando observó fluidos tales como una mezcla de arena húmeda que se dilataba (expandía) si la cizallaba. Aunque parece que la mayoría de los fluidos dilatantes se dilatan, no es una norma absolutamente general. Pero esto nos da un modelo sencillo para explicar la naturaleza de los fluidos dilatantes.

Hace algunos años, Richard E. Berg, de la Universidad de Maryland, me exhibió una demostración sencilla del modelo de Reynolds para los fluidos que se dilatan. Me hizo estrujar una botella de plástico de medio litro, provista de un tapón con un tubo abierto en su parte superior. Estaba parcialmente llena de arena (también pueden usarse bolitas, pero entonces el efecto es más difícil de ver); rellenó luego con agua hasta el ras del tubo introducido en el tapón. Cuando apreté suavemente la botella de plástico, el material que encerraba me oponía una considerable resistencia. Al apretarlo con violencia, la resistencia fue tal que apenas conseguí estrujar la arena. El nivel del agua cambió también al estrujar la botella, pero su cambio no fue el intuitivamente esperado. El nivel de agua, en vez de ascender, bajó varios centímetros en el tubo.

Reynolds ha explicado este hecho (para la arena) estableciendo que, al principio, los granos están compactados tan estrechamente como les es posible y se encuentran demasiado cerca unos de otros para permitir que el agua, debido a su tensión superficial, ocupe todos los espacios que quedan libres entre los granos. Berg provocó en parte este apelmazamiento de los granos golpeando varias veces la botella. El que la mezcla del interior de la misma ceda cuando se aprieta, significa necesariamente que parte de los granos se mueven uno sobre otro distanciándose entre sí más de lo que estaban al comienzo. A consecuencia de ello, aumenta el volumen total ocupado por los granos, dejando suficiente espacio entre ellos para que el agua fluya a su través. Aunque las paredes de la botella se hallan presionadas con suavidad hacia dentro, este flujo de agua entre los granos provoca que descienda el nivel del líquido en el recipiente.

El modelo de Reynolds explica también el incremento de la resistencia al estrujamiento. Al realizar un apretón súbito, con la consiguiente dilatación, no basta la cantidad de agua presente entre los granos para producir la lubricación necesaria para que los granos puedan resbalar. Por tanto, un cizallamiento brusco provoca una fricción adicional entre los granos y un incremento de la viscosidad aparente de la suspensión. Cuanto más rápido sea el cizallamiento, con mayor celeridad se mueven los granos entre sí, abandonando su estado estrechamente compactado, y menor es la lubricación. El conjunto va aumentando su resistencia al ser apretado. Por el contrario, si la presión se hace más lentamente, el agua puede moverse por el espacio que va quedando entre los granos con lo que el rozamiento se mantiene bajo.

Un ejemplo similar puede observarse en la orilla del mar. Al pasear por la franja de arena que está húmeda, pero no hasta el punto de que los granos floten, las huellas que vamos dejando tienen un aspecto seco y relativamente blando durante un corto intervalo de tiempo, suponiendo —claro está— que hemos mantenido el pie en ese sitio durante un tiempo breve. Si dejamos el pie allí mucho tiempo el efecto se pierde.

Por unos instantes, el peso del pie aplasta la arena. Puesto que la arena se encuentra ya sólidamente compactada, sólo puede desplazarse en dirección a una disposición donde la compactación sea menor. Ello indica que ocupará un volumen mayor, expandiéndose hacia arriba la zona sometida a presión, rebajando el nivel de agua un poco por debajo de la superficie. Con el tiempo, el agua ascenderá a través de los granos que se habían elevado alcanzando la superficie, que volverá a asumir su aspecto húmedo.

Esta demostración puede repetirse sin mayores dificultades en un cajón de arena. Para observar cómo se seca la arena cuando se la somete a presión, basta colocar un trozo de cristal grueso sobre su superficie y empujarlo luego hacia abajo. Me permito recomendar el uso de un émbolo de fontanero para presionar sobre el cristal; con ello, eliminaremos el peligro de cortarnos en caso de que el cristal se rompa.

Las arenas movedizas constituyen otro ejemplo de fluido dilatante. Una suspensión de arena en agua se llama movediza cuando el líquido está sometido a presión, procedente de una pequeña acometida de agua por debajo de la superficie, un manantial natural, por ejemplo. Si a una profundidad cualquiera la presión adicional de agua se hace igual o ligeramente superior a la presión de la arena en dicha profundidad, los granos de arena se separan ligeramente y presentan una buena lubricación. Un objeto pesado situado encima se hundiría hacia el fondo debido a la baja fricción que encuentra con la suspensión.

Si se agita rápidamente la suspensión, aumenta la viscosidad; ello se debe a que los granos se encontraban inicialmente en casi su mayor compactación y, al agitarlos, el

conjunto se dilata un poco. Como antes, una dilatación súbita deja algunos granos sin buena lubricación y, en consecuencia, ofrecen una mayor resistencia al movimiento. Si un objeto, por ejemplo la pierna de un hombre, se sumerge en arenas movedizas, la dilatación presionaría más estrechamente la arena contra el objeto haciendo aún más difíciles sus movimientos. Las arenas movedizas no son tan peligrosas cuando la presión debida a la corriente del agua es grande, ya que entonces los granos están suficientemente separados y la arena no se dilata. Pueden ser incluso arrastrados por la corriente de agua. Las arenas no se convierten en movedizas si no hay una corriente de agua, ya que cualquier agua extra separa la parte superior del lecho fuertemente compactado de arena, creando una situación similar a la que hemos descrito en la playa y en la demostración con la botella de plástico.

El lector puede fabricarse su propio pantano de arenas movedizas. Para ello hay que llenar un recipiente grande con arena y poner una manguera de modo que entre agua por el fondo. Ajustando de forma apropiada la presión del agua en la manguera se pueden levantar ligeramente los granos, para que se conviertan en arenas movedizas. Si la presión del agua es demasiado baja, un objeto de peso medio que se coloque encima de la arena permanecerá quieto, pero cuando la presión del agua sea suficiente como para tornar movediza la arena, el objeto se deslizará a través de ésta hasta el fondo.

La mayoría de la gente no sabe cúal es la mejor manera de escapar de las arenas movedizas. Cuando caen en ellas, piensan que la mejor forma de salir es forcejeando, pero lo que ocurre es que cuanto más luchan, más baten las arenas y mayor es la dilatación de las mismas y la viscosidad aparente. Si alguna vez el lector cayera en arenas movedizas, le aconsejaría que tratara de ponerse a salvo moviéndose tan lentamente como le fuera posible (por supuesto que una persona en esa situación no desea mantenerse casi quieto, porque si así fuera todas estas sugerencias serían innecesarias). Si nos encontráramos hundidos hasta la rodilla, deberíamos tendernos boca arriba en la superficie (para flotar), extender los brazos y liberar las piernas. Una vez alcancen éstas la superficie, hay que ir hacia la orilla dando vueltas o reptando, tratando siempre de mantener el peso del cuerpo repartido en la mayor cantidad de superficie posible. Si se repta, debe hacerse empujando enérgicamente hacia atrás con los pies y las manos a fin de que el carácter dilatante le proporcione un fluido más firme.

El ejemplo más sencillo de un fluido dilatante que puede obtenerse en una cocina lo constituye una simple mezcla de agua y almidón de maíz (o cualquier otro tipo de almidón común). Para hacer la mezcla, se añade agua al almidón hasta que la mezcla esté un poco espesa. Al verter la mezcla, o bien al pasarla a cucharadas a otra taza, se debe dejar que ésta resbale para comprobar que fluye con relativa facilidad a una viscosidad baja. Esto se comprueba dando un puñetazo a la mezcla: si la viscosidad permaneciera en su bajo valor inicial, el fluido saltaría salpicándolo todo. Sin embargo, el rápido cizallamiento hace que la viscosidad tome un valor tan elevado que la salpicadura no llega a producirse, aun cuando el golpe se haya dado con toda energía. Apenas salpica tampoco si arrojamos la mezcla al suelo. De ahí que a los niños les encante manipular con ella.

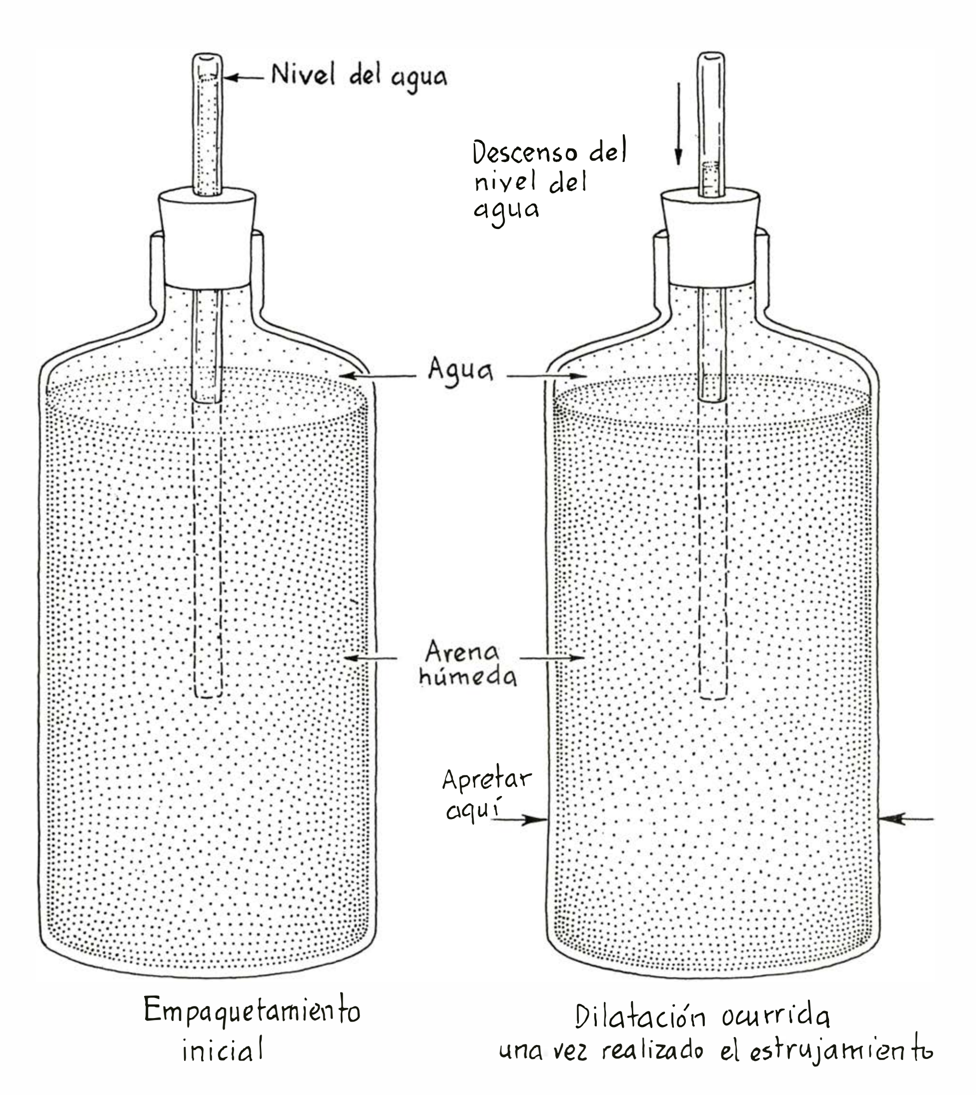
Si el recipiente es pequeño, se puede levantar ligeramente e, introduciendo un palito en la mezcla, tirar de él con vigor. Al levantarlo, el súbito cizallamiento aumenta la viscosidad, de manera que la mezcla se adhiere al palo.

Se han presentado otras teorías distintas de la hipótesis de la dilatación para explicar el comportamiento de los fluidos dilatantes compuestos por suspensiones de partículas. De acuerdo con una de ellas, al friccionar unas partículas contra otras adquieren carga eléctrica. El aumento de la viscosidad se debe entonces a la atracción eléctrica existente entre las partículas.

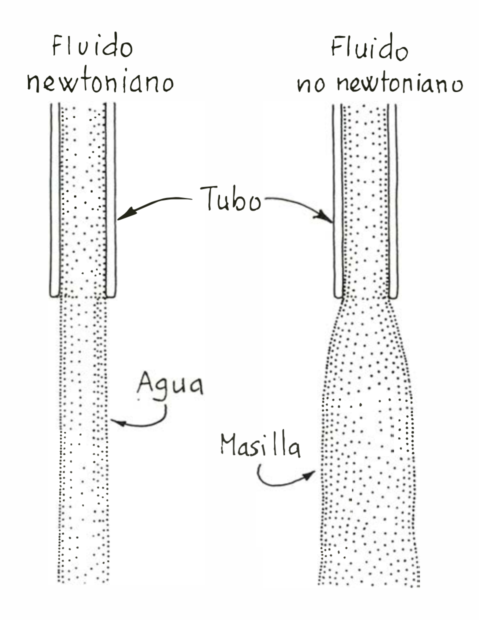
Algunos fluidos dilatantes son suspensiones o soluciones de moléculas de cadena larga (polímeros) que están enrolladas o formando bucles. Cuando el fluido se somete a un cizallamiento, las moléculas se estiran y se alinean perpendicularmente a la dirección del flujo, a consecuencia de lo cual aumentan la viscosidad aparente por oposición a la corriente. El alineamiento ocurre de un modo casi instantáneo y desaparece también con idéntica rapidez cuando cesa la fuerza de cizallamiento.

Se puede extraer abundante información sobre diversos ejemplos de fluidos dilatantes y sobre fluidos no newtonianos en general en una serie de artículos de A. A. Collyer, del Sheffield City Polytechnic de Inglaterra. Dichas publicaciones, cuya referencia bibliográfica se encuentra en la página 112, contienen gran cantidad de demostraciones.

Cuesta más hallar ejemplos de fluidos seudoplásticos. Collyer afirma que dichos fluidos pueden obtenerse mezclando óxido

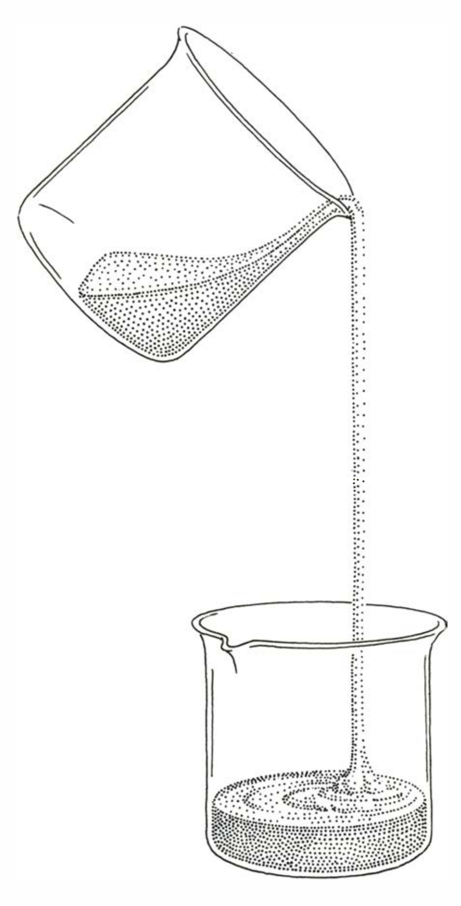


Demostración de un fluido dilatante de Richard E. Berg



El fenómeno de "hinchazón muerta"

de polietileno (frecuentemente llamado Polyox, marca registrada por la Union Carbide Corporation) con agua destilada para obtener una solución al 0,01 por ciento. ("Por ciento" se refiere al peso del soluto con respecto al peso total de la solución.) Para las demostraciones que a continuación describiremos aconsejaría el empleo de Polyox WSR-301, polímero con miles de enlaces de CH_2 y con un elevadísimo peso molecular (aproximadamente cuatro millones de unidades de masa atómica). El Polyox se disuelve lentamente en agua. Collyer recomienda ir formando estratos de Polyox y de agua alternativamente. Durante tres o cuatro días se debe mantener el recipiente tapado, agitándolo de vez en cuando, sin demasiada violencia, pues pueden romperse las moléculas de cadena larga (la Union Carbide Corporation ha tenido la amabilidad de enviarme una cantidad suficiente de Polyox WSR-301. Para obtener una muestra de este producto el lector puede remitirme una tarjeta postal y 2 dólares para gastos de envío al departamento de Física de la Universidad estatal de Cleveland, Cleveland, Ohio 44115).



Autosifón en un fluido viscoelástico

Cuanto más fuerte se bate un fluido seudoplástico, más decrece su viscosidad. A la larga, si la velocidad es lo suficientemente rápida, la viscosidad se estabiliza en un valor pequeño. En cuanto el batido cesa, la viscosidad vuelve a su antiguo valor. Al verter el fluido, parte del mismo se muestra como grumoso comparado con otras porciones, debido, según parece, a que el batido no es uniforme a lo largo de todo el fluido en movimiento y, por ende, tampoco la viscosidad lo es.

Una explicación del comportamiento de los fluidos seudoplásticos sería que, bajo la acción de las fuerzas de cizalladura, las partículas asimétricas o las moléculas largas del fluido se alineasen paralelamente a las líneas de corriente y ofreciesen una menor resistencia al flujo. La viscosidad mínima se obtendría cuando todas las partículas o moléculas se encontrasen alineadas. El grado de alineamiento, y por tanto, la viscosidad del fluido dependen de la intensidad del cizallado.

El otro tipo de fluido no newtoniano es bastante similar tanto a los seudoplásticos como a los dilatantes, si bien su viscosidad depende no sólo de la intensidad del cizallado, sino también del tiempo que éste dure. Una vez que dicha operación cesa, transcurre cierto tiempo hasta que la viscosidad vuelve a recuperar su valor inicial. Estos fluidos son, por tanto, dependientes del tiempo.

Si la viscosidad decrece al batirlo, se dice que el fluido es thixotrópico; si aumenta la viscosidad, el fluido es thixotrópico negativo. De este último tipo hay pocos ejemplos, pero abundan de los thixotrópicos, verbigracia: la margarina, determinadas pinturas, las cremas de afeitar y el catsup (una especie de salsa de tomate). La margarina, por ejemplo, tiene una elevada viscosidad que, en cambio, decrece cuando se extiende sobre una tostada. Si no se comportara de esta forma sería muy difícil extenderla.

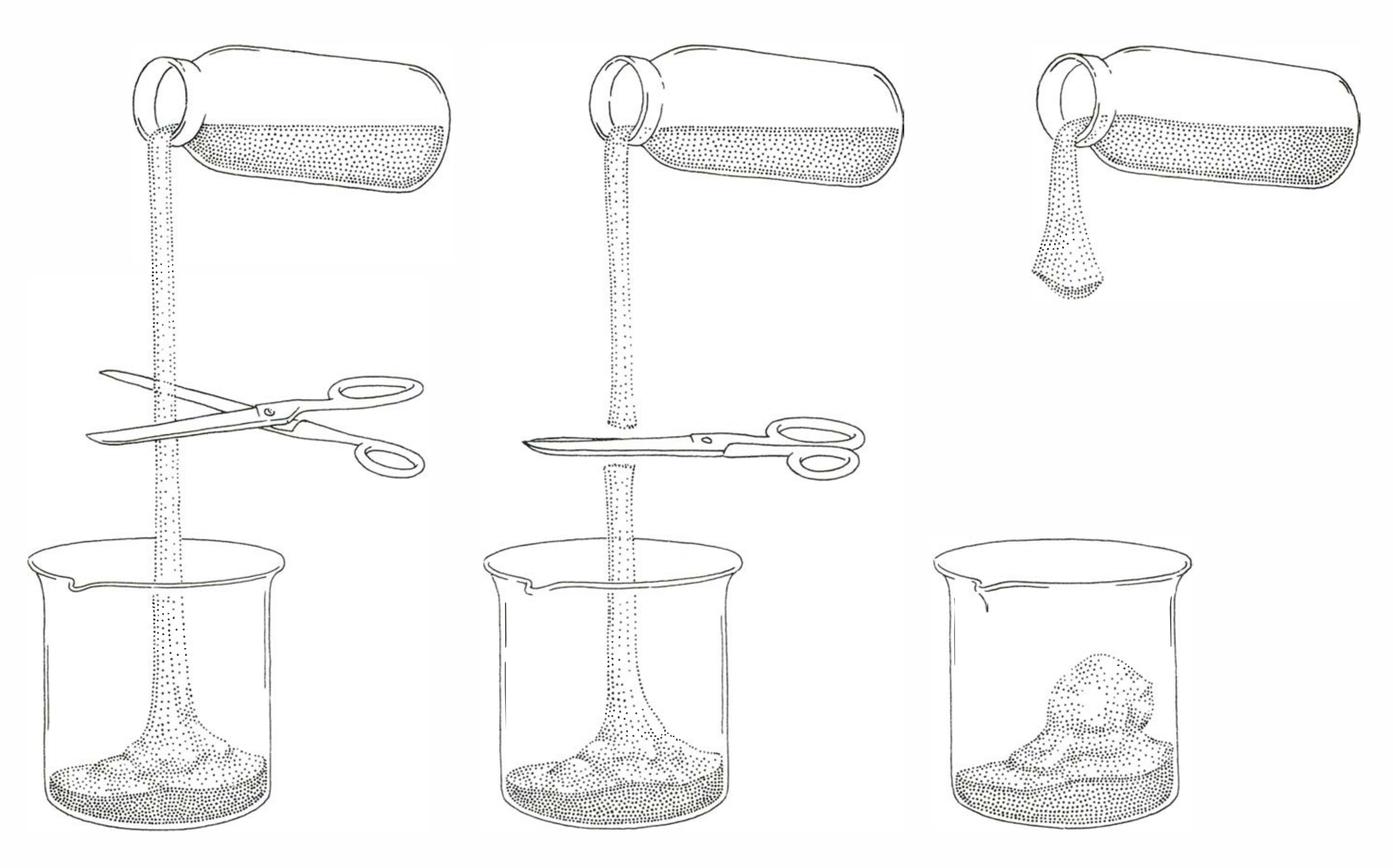
No hay ninguna teoría que explique el cambio en la viscosidad de todos los fluidos thixotrópicos. Si el fluido está compuesto por moléculas asimétricas o por partículas, la viscosidad puede decrecer cuando dichas partículas se alineen paralelamente a las líneas de corriente del fluido durante el batido. Este modelo difiere del de los fluidos seudoplásticos en que los enlaces entre las moléculas tardarían más tiempo en romperse o bien en que la resistencia de los enlaces sería variable en el fluido.

Para suspensiones de ciertas partículas, la arcilla por ejemplo, es preciso acudir a otras teorías. Su estructura inicial, antes de someterla al batido, podría considerarse como un gel en el cual las partículas suspendidas se mantienen en su sitio por una estructura ordenada, por fuerzas eléctricas entre las partículas o por capas de agua entre ellas. Con el batido, el gel se transforma en un sol (un fluido coloidal menos denso) conforme se destruyen algunas estructuras. Si el fluido thixotrópico está compuesto por polímeros, puede suponerse de nuevo que el alineamiento a lo largo de las líneas de corriente es el primer responsable del cambio en la viscosidad. En suma, que el batido puede desenrollar, desenredar y alargar los polímeros para rebajar la viscosidad. Los fluidos negativamente thixotrópicos pueden explicarse a través de una hipótesis según la cual el número de enlaces intermoleculares aumenta durante el movimiento, por lo que la viscosidad incrementaría a medida que el fluido se fuera transformando en gel.

El catsup puede servir para experimentar con un fluido thixotrópico. Si se agita durante unos minutos, su viscosidad decrece, e incluso puede convertirse en un líquido muy fluido. Quizá se haya dado cuenta el lector de ese detalle si ha vertido catsup embotellado después de haber sacudido el envase con energía.

Yo mismo probé la naturaleza thixotrópica del catsup de una manera muy simple: llené un recipiente con esta salsa, la dejé reposar durante cinco minutos, después eché sobre ella bolitas de acero y cronometré el tiempo que tardaban en llegar al fondo. Dado que no podía ver a través del catsup, coloqué el recipiente sobre una lámina de plástico transparente puesta sobre un soporte redondo. A través del plástico podía ver cuándo alcanzaban las bolas el fondo, bolas que iba echando de cinco en cinco minutos.

Después de haber cronometrado cinco caídas, introduje una variación, revolvía el catsup durante un minuto justo antes de echar la bolita. El tiempo medio de caída sin agitarlo era de 27 segundos; moviéndolo era de 13. El hecho de revolverlo hacía disminuir la velocidad y ésta no se recuperaba hasta varios minutos después de haber dejado de remover.



Retroceso elástico de una corriente de fluido que ha sufrido un corte

El tercer tipo general de fluidos no newtonianos de los que hablaré incluye algunos que además de ser bastante viscosos, se muestran elásticos. Ejemplos de este tipo de fluidos son: masilla de silicio, aditivo STP para tratamiento de aceites, algunas sopas concentradas, ciertos aceites lubricantes y la parte espesa de la clara de huevo. La elasticidad se debe, en general, al enrollamiento de los polímeros en el fluido. La ruptura y la tensión pueden comprimir o extender estas moléculas de cadena larga, las cuales se comportan entonces como muelles.

La masilla de silicio, que es como ya se ha dicho un fluido viscoelástico, deriva del aceite de la dimetil-silicona (las instrucciones para hacerlo en el laboratorio se publicaron en el *Journal of Chemical Education*, vol. 50, 1973, pág. 434). Esta sustancia tiene tres tipos interesantes de tensión y ruptura. Si se cizalla lentamente, la masilla fluye como un líquido muy viscoso: si se cuelga de una varilla, irá cayendo poco a poco. Sin embargo, si se cizalla más de prisa, la masilla actuará como una pelota de goma. Si hacemos con ella una bola, la podremos botar en el suelo; su capacidad para recuperar la elasticidad es bastante alta. Al cizallar más de prisa esta masilla apenas si tiene elasticidad. Si tiramos vigorosamente de un trozo, se rompe como si fuera una varilla metálica que se torciera con violencia.

Aparecerá otra característica interesante de ciertos líquidos elásticos si introducimos cierta cantidad de masilla de silicio dentro de un tubo y la extraemos por el extremo opuesto del mismo. Cuando ésta sale del tubo, se expande en lo que se ha llamado "hinchazón muerta". Esta expansión constituye un inconveniente para la fabricación de fibras sintéticas; éstas manifiestan esa misma expansión cuando se hilan a la salida de un orificio, porque éste debe diseñarse para permitir la hinchazón y así poder dar a la fibra el tamaño y la forma deseados. Esta expansión se demuestra también con una solución de Polyox que tenga una concentración de un uno por ciento.

El hinchamiento parece estar causado por un súbio rechazo de la cizalladura y a la tensión a que está sometido el fluido cuando se le obliga a pasar a través del tubo y por la abertura de salida. En el tubo, las moléculas de cadena larga se contraen ante la fuerza del empuje. Cuando salen del tubo se expanden de repente para aliviar la tensión interna. Si se deja la masilla en el tubo, durante un rato, antes de hacerla salir por el extremo, no se expande tanto. En esas condiciones, la tensión se alivia por alguna otra razón.

El retroceso elástico puede observarse también en soluciones de Polyox agitadas y en sopas concentradas. Para el Polyox, Collyer recomienda una solución al 2,5 por ciento. Yo mismo hice un experimento con una solución diluida de sopa de tomate Campbell, siguiendo una sugerencia de Peter Murphy, del Centre College de Kentucky, quien me había advertido del efecto. El experimento se desarrolló así: añadí un bote de agua a otro bote de sopa concentrada. Agité lentamente la solución con una cuchara y la saqué. Cuando el remolino estaba a punto de pararse, cambió la dirección del movimiento. Esta inversión del movimiento constituye un rechazo contra las tensiones y rupturas creadas por el remolino en el fluido elástico.

Algunos fluidos elásticos pueden autoexpulsarse de un recipiente una vez que se ha iniciado una corriente descendente (efecto llamado de autosifón). Para esta demostración Collyer recomienda una solución de Polyox al 8 por ciento. El fluido es lo suficientemente elástico como para que una vez que se tiene una buena cantidad de éste colgando del borde de un recipiente en alto, la parte que cuelga subirá la mayor parte del fluido del recipiente al borde y después se desbordará por el lateral. Se puede cambiar la dirección del fluido disminuyendo la longitud del líquido colgante. Por ejemplo, se puede hacer que el líquido que cuelga caiga a otro recipiente y después elevar lentamente al segundo recipiente para hacer decrecer la longitud de fluido entre los dos.

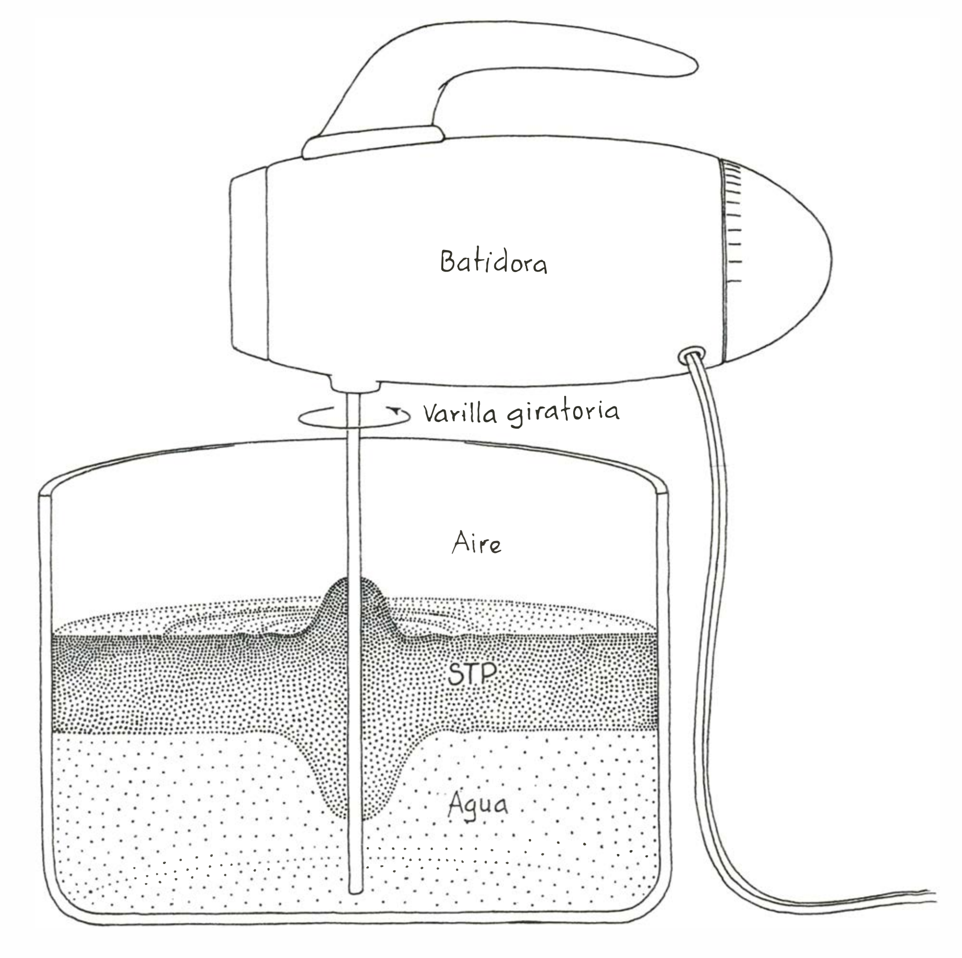
Se puede descubrir una tendencia similar a la elevación si se succiona Polyox de un recipiente con una jeringa hipodérmica. Primero se sumerge la jeringuilla en la superficie del líquido y luego, a medida que se va tirando del émbolo, se va levantando la jeringa. El fluido sigue ascendiendo dentro de la jeringa aun cuando se haya levantado la aguja de 5 a 10 centímetros por encima de la superficie de Polyox del recipiente. El líquido se mueve a lo largo de la superficie, alcanza la delgada corriente hacia la jeringa, sube y entra dentro de ésta.

Con unas tijeras se puede cortar una corriente descendente de solución de Polyox al 2,5 por ciento. Para ello hay que frotar primero las mismas con vaselina para evitar que se pegue; luego se corta la corriente por unos centímetros más abajo del borde del recipiente del que se está vertiendo el fluido. Una vez que se ha dado el corte, la parte alta de la corriente se recoge hacia arriba y vuelve al recipiente.

Este efecto puede demostrarse también con Slime, un nuevo juguete que acaba de aparecer en Estados Unidos. Se trata de un fluido verde viscoelástico que muestra hinchamiento y autosifón; puede cortarse y tiene contracción elástica. Se parece a la masilla de silicio, pues presenta tres tipos distintos de respuesta al cizallamiento y a la tensión interior. Si se cizalla poco a poco, fluye como un líquido de gran viscosidad, pero si se cizalla de prisa se contrae como una superficie de goma y, si se hace con violencia, se rompe.

Observaremos dos reacciones de éstas dejando caer una bola de acero en la superficie del Slime. La bola entra ligeramente en la superficie, haciendo que ésta oscile como lo haría una superficie de goma. La bola se hunde luego con suavidad en la superficie y baja al fondo del Slime. Esta sustancia, que puede adquirirse en la mayoría de las tiendas de juguetes, es probablemente una solución polímera muy similar a la de Polyox. El fluido resulta casi irresistible para los niños y para los adultos, debido quizás a que el tacto y comportamiento de un fluido viscoelástico son muy distintos del tacto y viscosidad que uno se imagina.

Uno de los efectos más extraños de algunos fluidos elásticos es su respuesta cuando se agitan con una varilla central giratoria. La fuerza centrífuga podría determinar que, en un fluido normal movido así, se formara una superficie cóncava con su punto más bajo en el centro del recipiente. Cuando se agita de este modo un determinado fluido elástico, ocurre justo lo contrario: se desplaza hacia el centro y asciende por la varilla formando el llamado "efecto Weissenberg" (en honor de K. Weissenberg, quien estudió este fenómeno en los años 40). Hay varios fluidos que manifiestan este comportamiento: la gelatina, algunas marcas de leche condensada, ciertos tipos de miel (la de brezo), el aditivo STP para tratamiento de aceite, algunos tipos de aceite, Polyox y la parte espesa de la clara de huevo. Para el Polyox, Collyer recomienda una solución al 2,5 por ciento.



Un efecto Weissenberg doble

Después de mezclar la gelatina con agua caliente a una temperatura de unos 54 grados centígrados, 130 Fahrenheit, el fluido resultante fue newtoniano hasta que adquirió una temperatura de 30 grados (86 Fahrenheit). A partir de entonces, y hasta convertirse en gel a los 28 grados centígrados, la tendencia ascendente de la mezcla aumentó a medida que la temperatura disminuía.

¿Por qué se comporta de una manera tan extraña un fluido viscoelástico? Cuando se vierte en una dirección, su estructura provoca la aparición de fuerzas perpendicularmente adicionales. En el efecto Weissenberg, la fractura que produce la varilla giratoria origina una fuerza radial hacia dentro, en torno a la varilla, empujando el fluido hacia ésta y obligándole a que ascienda por ella. Cuanto mayor sea el índice de ruptura, mayor será la fuerza radial hacia dentro y el líquido subirá más. La superficie puede tomarse como un sistema de bandas elásticas concéntricas. Cuando éstas giran a velocidades diferentes, a causa de la viscosidad del fluido, crean fuerzas de rompimiento entre ellas, las cuales, a su vez, crean las fuerzas radiales que tratan de contraer las bandas elásticas hacia el centro.

Se obtienen los mismos resultados si en vez de girar la varilla lo hace el recipiente que contiene el fluido. De nuevo, las fuerzas opuestas en torno a la varilla central hacen que el líquido fluya hacia dentro. Si se sustituye la varilla por un tubo hueco, el fluido ascenderá a través del tubo y lo hará con mayor celeridad cuanto más rápido gire el recipiente. Si se coloca una hilera de tubos a lo largo del diámetro de la superficie del fluido, éste muestra claramente la tendencia ascendente; las alturas en el interior de los tubos van aumentando desde el borde hasta alcanzar el máximo en el tubo central. Este efecto se aprecia mejor si los tubos han sido sometidos a un vacío parcial. En algunas circunstancias, el objeto central puede ser un disco plano sostenido por una varilla central desde arriba. Si se baja primero el

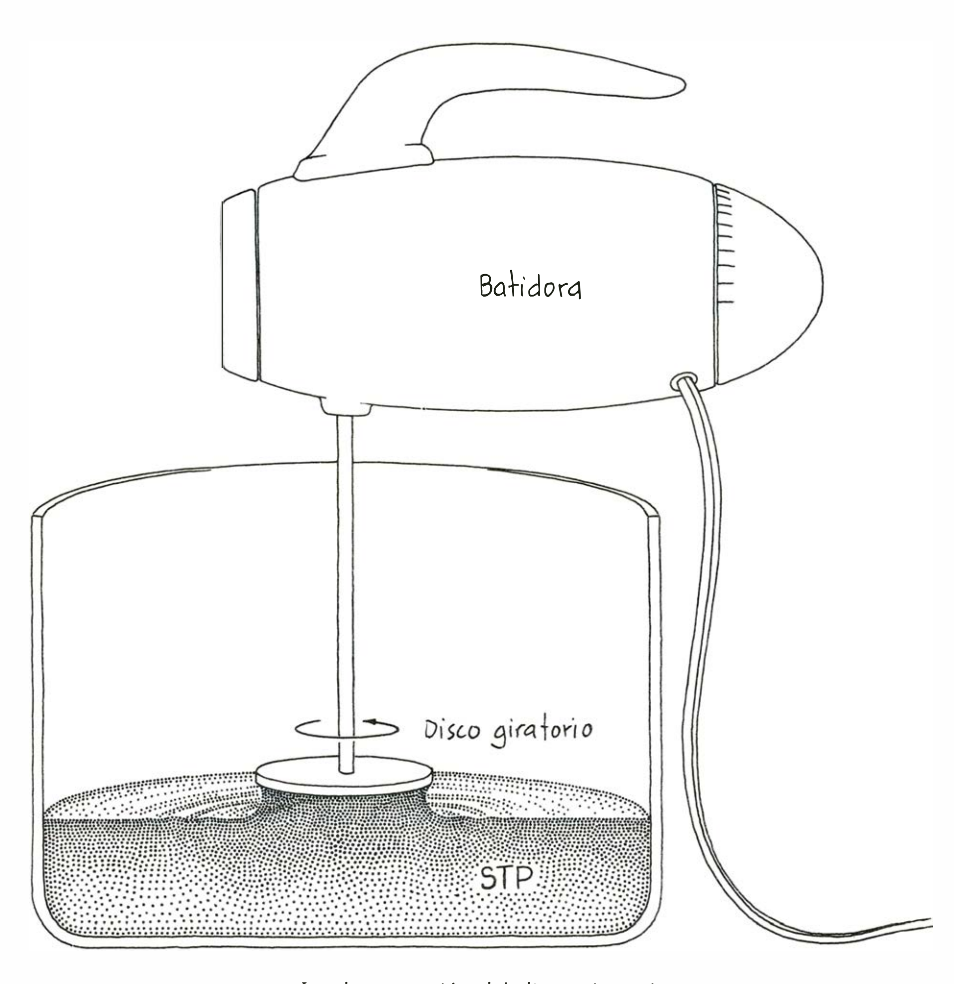
disco hasta la superficie del líquido giratorio y después se eleva lentamente puede hacer que el líquido se eleve bajo el mismo.

Gordon S. Beavers y Daniel D. Joseph, de la Universidad de Minnesota, publicaron recientemente en el *Journal of Fluid Mechanics* una nueva manera de conseguir el efecto Weissenberg en el aditivo STP para tratamiento de aceite. Para ello pusieron varios centímetros de este líquido sobre una capa de agua y agitaron ambas capas con una varilla central rotatoria. El fluido STP es viscoelástico y normalmente muestra el efecto Weissenberg; ahora bien, además de ascender por la varilla, descendía también por ésta dentro del agua. Dado que la gravedad ayudaba a impulsar el fluido STP hacia abajo, el pandeo descendente alrededor de la varilla era más pronunciado que el ascendente. Si se sustituye el agua por un fluido con una densidad afín a la del fluido STP, el pandeo inferior sería aún mayor.

Si el lector quiere producir el efecto Weissenberg, puede usar un cuenco montado sobre una mesa giratoria. Se podría poner también un recipiente pequeño sobre un taladro manual invertido. De preferirse una varilla central rotatoria, puede usarse una empalmada a un taladro eléctrico, pero hay que tener cuidado de no estropear el recipiente ni hacer saltar líquido al motor del taladro. Este accidente puede causar heridas graves e incluso la muerte.

Hice el experimento con una batidora de cocina corriente que tenía distintas velocidades. Con una sierra de metal corté las cuchillas de un batidor de suerte que quedara sólo la varilla central; luego repasé la varilla con una lima. Después de desarmar el otro batidor de la misma manera, pegué un disco plano al extremo del batidor, de forma que pudiera hacer el experimento del disco. Para controlar mejor la velocidad, conecté la batidora a un punto de potencial variable, de suerte que pudiera cambiar fácilmente el voltaje que le llegaba, pero dado que este procedimiento puede estropear algunas batidoras, no recomendaría usarlo por norma general.

Tras fracasar con ciertas marcas de leche y con otros fluidos envasados, probé con la clara de huevo; ésta mostró un ascenso notable con la batidora puesta a la velocidad máxima (para separar la clara de la yema se puede usar un simple utensilio que venden en las tiendas de artículos de cocina). El fluido STP dio buen resultado, ascendiendo y descendiendo de la forma descrita por Beavers y Joseph. Con la batidora a velocidad máxima, el ascenso fue de casi un centímetro.



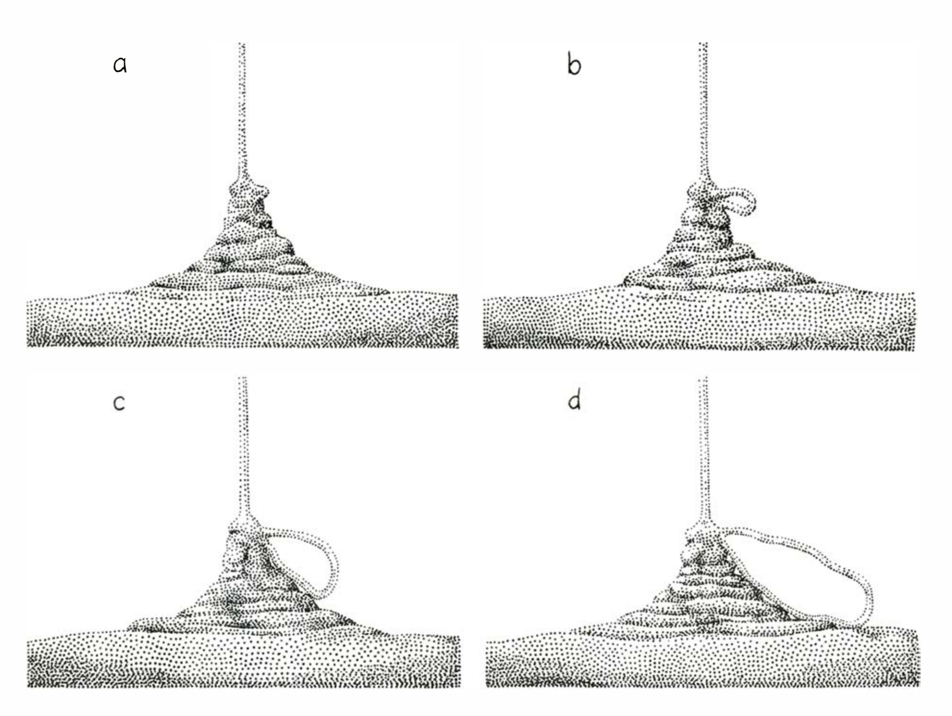
La demostración del disco giratorio

Para estudiar el efecto Weissenberg quizás el lector quiera probar con otros fluidos (distintos grados de aceite lubricante y diferentes tipos de fluidos elásticos, la miel por ejemplo). Algunos fluidos pueden sustituirse por STP y aceite en la demostración de la ascensión. El lector puede relacionar la profundidad del descenso con la diferencia de densidad de los dos fluidos. Se puede añadir encima un tercer fluido (que reemplace al aire). Sería interesante averiguar la relación existente entre la altura del ascenso y la velocidad de rotación y concentración del fluido en cualquiera de las demostraciones de Weissenberg.

En 1963, A. Kaye, actualmente en el Instituto de Ciencia y Tecnología de Manchester, notó que cuando se vierte una solución viscoelástica de poliisobutileno en "decalina" desde una altura de 25 centímetros en un plato con el mismo fluido, brota de vez en cuando de éste un chorro fino que parte del punto donde cayó. Este efecto, que lleva el nombre de su descubridor, Kaye, ocurre de la siguiente manera. La corriente descendente crea primero una pequeña acumulación de fluido en el punto de impacto. Luego se desarrolla un pequeño chorro que fluye hacia fuera de la acumulación en una trayectoria baja, que algunas veces se hunde. El hecho de que el fluido saltara de esta forma no se entendía en un principio.

Collyer y P. J. Fisher afirmaron recientemente que la corriente ascendente es una curva del fluido. Explicaron este efecto Kaye tras examinar películas del chorro a gran velocidad y reducir su movimiento. La viscosidad de líquido es bastante alta y rígida, debido a que el fluido, en la acumulación inicial, se mueve con suavidad. A medida que desciende el fluido de la corriente, su índice de caída es lento y su viscosidad alta. Pero, al producirse el impacto, el índice de caída aumenta de repente y el fluido elástico se hace más fino al caer, de manera que puede rebotar si choca con la superficie rígida de la acumulación.

Collyer recomienda mezclar el poliisobutileno con la "decalina", cortando el primero en trozos pequeños antes de añadirlo al líquido. Después, hay que dejar cubierta la mezcla durante unas tres semanas para que se mezcle bien. Collyer me ha comunicado que el efecto Kaye se puede demostrar, sin tantas complicaciones, con ciertos tipos de champú, aunque el salto resulte menos abrupto.



Un líquido que salta mostrando el efecto Kaye

Los saltos duran un segundo más o menos, de manera que hay que estar mirando a la solución muy atentamente o hacerle fotografías de alta velocidad. Para crear los saltos debe ajustarse la altura del recipiente del champú, de forma que la corriente que salga de éste sea un tanto estrecha. Dentro de un cierto rango crítico de caída, la corriente saltará por sí misma.

Herr, de la Universidad de Nueva Orleans, recordaba haber visto más de dos arcos iris simultáneos, quizás incluso cuatro, en Malasia, donde se producen a menudo breves tormentas brillantemente iluminadas con luz directa del sol. Se dice que otros lugares, como Irlanda, reúnen condiciones favorables para la aparición de arcos iris brillantes, posiblemente con más de los dos primeros órdenes, debido a que muchos chaparrones están iluminados por luz solar directa. Estas observaciones serían improbables en lugares donde una tormenta significa normalmente que todo el cielo está cubierto antes y después de llover.

J. R. Prescott, de la Universidad de Adelaida, describió lo que podría haber sido el de tercer orden bajo una circunstancia extraña. Como quedó demostrado en mi experimento del arco iris, el de tercer orden se sitúa en la porción del cielo próxima al sol y, por ello, se pierde normalmente debido a su brillo. Prescott observó, justo antes del ocaso, colores en forma de arco a través de la lluvia que caía de nubes muy obscuras, lo suficientemente altas, hacia el suroeste, como para que el sol se dejara ver bajo las mismas. Los colores se veían sobre un fondo obscuro, mientras que la lluvia estaba bien iluminada por un sol bajo. Si esta escena era realmente de un arco iris de tercer orden, ello significa que el arco iris se hace visible cuando el fondo es lo bastante obscuro como para evitar que la luz del fondo del cielo oculte los colores del mismo.

Quizás al lector le guste buscar cuidadosamente una situación similar de las nubes, la lluvia y el sol. Si se fotografiara el arco de color, por las medidas de su espesor podría verificarse si el arco era realmente un arco iris o un halo de color o cualquier otro efecto óptico atmosférico, originado por cristales de hielo. Hay que tener cuidado en no confundir los arcos iris del quinto y sexto órdenes, que se extienden cerca de los dos primeros, con arcos supernumerarios bien desarrollados de los arcos iris primario y secundario. Si se consigue fotografiar un auténtico arco iris de un orden más alto, sería la primera fotografía conocida de otro orden que no fuera uno de los dos primeros.

Varios grupos han trabajado con el arco iris de gotas suspendidas descrito en mi artículo. Steve Lai, de Portland, observó varios arcos iris de orden superior. Para ver arcos iris de los órdenes décimo y catorceavo, cosa que requiere mirar casi a lo largo del rayo incidente, Lai utilizó un pequeño espejo de dentista a fin de reflejar la imagen de las gotas y los arcos iris manteniendo así su cabeza fuera del rayo incidente.

En la Feria Internacional de la Ciencia y la Ingeniería de este año, Joseph E. Becker, de Spokane (Washington), me mostró su trabajo que consistía en determinar de forma experimental una función por la cual pueda calcularse el ángulo de un arco iris de cualquier orden para un fluido de cualquier índice de refracción. Otras tres muestras de la feria versaban sobre temas tratados en esta sección. El fenómeno de Leidenfrost (octubre de 1977), sobre gotas de fluidos que flotan en una capa fina de vapor sobre un plato caliente, fue investigado por Jerry Ritter, Jr, de Cloudcroft, (Nuevo México) y por Stuart A. Travis de Akron (Colorado). Ritter estaba interesado en ver cómo cambia el punto de Leidenfrost cuando el agua está contaminada con varias sustancias y cómo la medida del punto de Leidenfrost puede servir para indicar la cantidad de contaminación. Travis midió los puntos de Leidenfrost del agua destilada (a 400 grados F) y acetona (a 330 grados F) y tuvo la buena suerte de fotografiar las gotas flotantes con una lente de 55 milímetros y una ampliadora de 6 aumentos.

Peter Rathmann, de Brookfield (Wisconsin), hizo un análisis impresionante de un oscilador de sal (diciembre de 1977) en el que determinó la frecuencia del oscilador en función del tamaño del agujero, tiempo de recorrido, diferencia de densidades entre el agua salada y la dulce y otros factores. Descubrió que, para el rango de agujeros suficientemente pequeños como para permitir que el sistema oscilase, la frecuencia de oscilación aumentaba en una proporción casi lineal según el tamaño del agujero. También demostró que la frecuencia disminuía a medida que el experimento llevaba más tiempo en práctica, resultado que interpretó como indicador de que a medida que el experimento transcurría, la diferencia de densidad entre los dos fluidos en el oscilador decrecía debido a la mezcla y, como consecuencia, la fuerza que impulsaba las oscilaciones se debilitaba.

Rathmann y J. E. Schmidt, de Charlestown (Indiana), han señalado de forma independiente que en mi artículo debía haber dado mayor relevancia a la naturaleza de péndulo del oscilador de sal. Una vez que el fluido empieza a correr, no se detiene cuando las presiones en el agujero se igualan, porque el fluido tiene fuerza y el sistema va más allá de su estado de equilibrio. En cuanto la corriente se para, el sistema vuelve otra vez a encontrarse con presión desigual alrededor del agujero, y el fluido empieza a correr en la dirección opuesta, rompiendo de nuevo el equilibrio y disminuyendo la velocidad hasta detenerse y volver a empezar. La inestabilidad de Rayleigh que describí en aquel artículo se exigía para mantener el oscilador en marcha: la viscosidad de los fluidos tiende a frenar el impulso de las corrientes. Si no fuera así, las oscilaciones de tipo pendular del sistema desaparecerían muy pronto.

Libros

Bioquímica estructural, polémica situación de la cosmología y erradicación de la malaria

Raimundo Goberna, Luis Mas y Philip Morrison

BIOQUIMICA ESTRUCTURAL, por P. Louisot. Editorial A. C.; primera edición española 1977, 498 págs. Traducido por el profesor José Viña Giner. Nos encontramos frente a una obra excepcional de bioquímica estructural. Sobresale por su claridad y facilidad de exposición. Intenta y logra plenamente llenar el vacío existente en lo que concierne a obras que enfoquen la bioquímica desde ese punto de vista. Se nos presenta de un modo tal que estructura, reacciones y principios químicos básicos guardan relación directa con el papel de las sustancias específicas en la fisiología de los mamíferos. Además, esta obra tiene especial interés para el estudiante de medicina y biología, porque le permite ir adquiriendo unos conocimientos en bioquímica estructural que le ayudarán a comprender de una manera más clara y precisa la función que las biomoléculas poseen en el ser vivo.

No encontramos, en la parte de las proteínas, la extensión y dedicación que ello merece, y que aparecen en otras obras recientes; pero, en cambio, nos alegramos de la buena exposición de los temas correspondientes a coenzimas y vitaminas, así como el resto del temario. La obra consta de cinco partes: glúcidos, ácidos nucleicos, vitaminas y coenzimas, lípidos y derivados isoprénicos y proteínas. Al estudiar los glúcidos, se detallan los distintos tipos, y se relacionan su estructura con el posible papel fisiológico o función. Verbigracia, en la descripción de los glucosaminoglucanos y su carácter poliamiónico se explica su papel como fijadores de cationes, en particular de calcio, y cómo en unión estrecha con el colágeno participan en la formación del cristal óseo. El autor pone de relieve la necesidad de conocer la estructura para comprender la función.

La segunda parte, dedicada a los ácidos nucleicos, se presenta como una revisión de los extraordinarios progresos registrados en la bioquímica de los mismos. Describe los métodos de extracción y separación del ARN y ADN y su estructura, con una rica iconografía. Relaciona la estructura con la función en ellos. Estudia por separado las estructuras primaria, secundaria y terciaria del ADN, ARN mensajero, ARN soluble, ARN ribosómico y ARN vírico. Presta atención especial al estudio de las propiedades fisioquímicas del ARN y ADN. Esquematiza los métodos que sirvieron para conocer la conformación espacial de los ARN. Detalla los enzimas de degradación de los ácidos nucleicos: ribonucleasas y desoxirribonucleasas, así como su papel biológico en la replicación de los mismos, recombinación bacteriana, mecanismo de reparación del ADN, etcétera.

La parte más importante es la dedicada a las vitaminas y los coenzimas. Establece una clara distinción entre grupos prostéticos y cosustratos. Clasifica las vitaminas de acuerdo con su acción coenzimática, de gran interés funcional; así, las divide en coenzimas de transferencia de grupos y coenzimas de óxido-reducción. A continuación, hace un estudio minucioso de cada vitamina, orientado hacia su estructura y mecanismo de acción. Y de esta forma, ofrece la base molecular para entender el fallo bioquímico originado al producirse la ausencia de alguna vitamina. Dentro de esta tercera parte, el último capítulo se refiere a las vitaminas que no son coenzimas de transferencia ni de óxido-reducción, como la vitamina *A* y las vitaminas *D*, estudiadas con los lípidos.

Los lípidos y los derivados isoprénicos constituyen el tema de la parte cuarta. Después de trazar una clasificación didáctica de lípidos, resaltando su importancia biológica como elementos de estructura y de reserva, describe la naturaleza y localizaciones principales de los ácidos grasos, así como sus propiedades físicas y químicas y su separación por cromatografía en fase gaseosa. De interés biológico y médico resulta la situación de los lípidos complejos en la estructura del tejido nervioso, la referencia de la importancia de los lípidos complejos en patología humana y el papel de los esfingolípidos en su posible relación con la inmunidad o el cáncer. Muy claro nos parece el tema correspondiente a lipoproteínas séricas. Aunque sólo se conoce parcialmente la estructura de las lipoproteínas, se aportan los datos obtenidos hasta la fecha; examina cada una de ellas y destaca el papel biológico de las mismas, tan relevante en el aspecto fisiológico como fisiopatológico. Termina el primer capítulo con una descripción de los métodos actuales de estudio de los lípidos y de sus asociaciones. El segundo trata de los derivados isoprénicos, en donde explica con acierto el destino de los intermediarios isoprénicos, entre los que se cuentan la vitamina *A* y las hormonas esteroides. Los diterpenos le dan pie para avanzar un bosquejo sumario del mecanismo bioquímico de la visión y concluye con la estereoquímica de los esteroles y derivados esteroideos.

Al abordar las proteínas, materia de la que se ocupa en la última parte, comienza por repasar la estereoquímica, propiedades y métodos de separación y evaluación cualitativa y cuantitativa de los distintos aminoácidos. Despliega todo un alarde ilustrativo en la exposición de los métodos de preparación, purificación y fraccionamiento de la proteínas. No pasa por alto las propiedades de las proteínas, y sopesa los métodos de valoración. Esquematiza la estructura de las proteínas. Establece una clasificación sencilla de las mismas. Estudia la hemoglobina y muestra un minucioso conocimiento de las inmunoglobulinas. Termina con la evolución de las proteínas.

Para finalizar quisiéramos exponer el planteamiento seguido por el autor sobre la bibliografía. No existe un índice bibliográfico al término de la obra, ni tampoco al final de cada capítulo. En su mente se halla siempre el destinatario: los estudiantes de cursos básicos. Por ello, la bibliografía, parca, se ciñe a los libros o artículos considerados de revisión. Estos se encuentran en el margen del texto, lo que facilita su lectura inmediata y dificulta su revisión posterior. La iconografía es excelente, didáctica y muy bien cuidada. Un buen texto, en resumen, para avanzar en la comprensión de la bioquímica dinámica. (R. G.)

COSMOLOGIA, ACTUALIDAD Y PERSPECTIVAS. Varios. Edición a cargo de Laurie John. Editorial Labor 1978. Sesenta años atrás, no podría haberse escrito ninguno de los capítulos que integran la obra. En ese corto período de tiempo, y en particular durante los quince últimos años, la cosmología ha ido adquiriendo rango de ciencia física, más todavía, avanzadilla de las ciencias físicas.

Bien es verdad que posee una metodología particular. Sir Hermann Bondi, en el capítulo primero, se muestra partidario de las teorías de Karl Popper y explica cómo debe aplicarse la "teoría de la demarcación" popperiana a la cosmología. Describe la confirmación o negación de las distintas teorías cosmológicas por los datos experimentales. La dificultad surge al considerar que los datos experimentales no son fruto de una experiencia previamente planeada por el hombre, sino que se deducen de la observa-

ción del único universo que tenemos, el nuestro.

Para el profesor W. H. McCrea, esta diferencia resulta fundamental. Y la pone de relieve. Cuando un físico aborda un problema determinado, busca unas leyes tales que le permitan describir una posible variedad de datos que él puede provocar en el laboratorio, variedad que depende de las condiciones iniciales de experimentación que escoja. En cosmología, el planteamiento se invierte: hay que buscar un modelo regido por unas leyes que nos den un único tipo de universo, el nuestro, que no dependa de las condiciones puestas por el sujeto.

Estas opiniones encontradas, o distintas, desarrolladas a lo largo de la obra, dan vivacidad al texto al obviar la visión monocolor del problema, cual vendría dada por un solo autor y que, a nuestro juicio, no sería objetiva. La controversia ha sido un carácter connatural de la cosmología. La novedad hoy estriba, no ya en las clásicas disputas metafísicas y filosóficas, sino en la interpretación o adaptación de las nuevas e importantes observaciones a distintos modelos cosmológicos, enteramente físicos.

Bernard Lovell subraya en la introducción la dificultad con que nos encontramos a la hora de interpretar cosmológicamente las observaciones, e insiste en que la mayoría de los autores son teóricos. El astrofísico experimental tiene otros muchos problemas más concretos y locales que resolver, dedicándole escaso margen al problema global de la cosmología.

A partir del descubrimiento, en 1920, del corrimiento hacia el rojo de la luz que nos envían las galaxias, por parte de E. Hubble, se fueron abandonando los modelos estáticos del universo, incluido entre ellos el modelo de Einstein. Fundamentalmente, se aceptaron dos posibilidades: el modelo estacionario y el modelo de la gran explosión (el famoso "big bang"). Hoy, este último está ganando terreno como refleja el libro, a pesar de la ilusionada, aunque no convincente, defensa del modelo estacionario que hace el profesor J. V. Narlikar. De todos modos, la cuestión no está decidida, según prueba, entre otros, el artículo recientemente publicado por J. F. R. Ellis en *General Relativity and Gravitation* (febrero, 1978); para éste, es posible, de acuerdo con los actuales datos de observación, substituir el universo en expansión, aplaudido por todos, por un universo estático ligeramente inhomogéneo con dos centros, y la Tierra cerca de uno de ellos. Recordemos que el profesor Ellis es uno de los grandes conocedores e introductores de los agujeros negros.

Los dos modelos citados presentan serias dificultades a nuestro modo de entender las cuestiones físicas hoy. El modelo estacionario incluye como hipótesis la creación de materia de un modo continuo, y si bien ello ocurre a un ritmo no observable, no resulta una hipótesis muy placentera para la comunidad de físicos; habría que exigirle una mayor precisión a nuestros aparatos de observación para comprobar la bondad de la hipótesis. El modelo de la gran explosión, descrito en sus primeros instantes de un modo espectacular por el profesor Taylor, comprende una posible singularidad inicial que no deja de ser preocupante desde un punto de vista conceptual.

Dicha singularidad está basada en un proceso físico contrario al de la producción de agujeros negros, que recibe el nombre de agujero blanco. Los agujeros negros vienen defendidos en el capítulo del profesor R. Penrose de una forma harto convincente. Precisamente se echa a faltar una adecuada réplica por parte de algún astrofísico experimental que expresara su escepticismo sobre la existencia real de los mismos. Y no es porque no los haya. Tampoco en el plano teórico las cosas aparecen tan meridianas como pretende translucir el profesor Penrose: el estudio de los casos sin simetría esférica es mucho más difícil y menos concluyente que el caso de la métrica de Schwarzschild. Incluso en el caso de simetría esférica hay posibilidades tanto de evitar el horizonte de sucesos, reinterpretando las propiedades topológicas del espacio-tiempo, como de evitar la singularidad central introduciendo otros campos, además del gravitatorio, de modo explícito en las ecuaciones del movimiento, según lo hacen la teoría de Brans-Dicke y otras.

No obstante el subtítulo de la obra, "Actualidad y perspectivas", y debido al ritmo acelerado con que registran nuevas observaciones los físicos experimentales y nuevas deducciones los físicos teóricos, algunas afirmaciones parecen haber quedado obsoletas. Así, por ejemplo, a propósito de los agujeros negros, los propios autores que introdujeron el concepto afirman ahora que sí salen partículas de ellos debido al efecto túnel, que se presenta al unir el campo gravitatorio con las teorías cuánticas ("La mecánica cuántica de los agujeros negros"; S. Hawking, INVESTIGACION Y CIENCIA, marzo, 1977). Ello obedecería, según Hawking, a que el agujero negro en estado no estacionario evolucionaría siguiendo las leyes de la termodinámica de estados de casi-equilibrio o procesos reversibles. Posteriormente, el profesor Sciama (en *General Relativity and Gravitation*, marzo, 1978) ha planteado también la posibilidad de que el agujero negro estacionario presente procesos de fluctuación-disipación por obedecer leyes de la termodinámica de procesos irreversibles. Tanto en un caso como en otro, el agujero negro perdería gran parte de su masa en forma de ondas gravitacionales.

El estudio y observación de ondas gravitacionales constituye otro campo polémico en el seno de la cosmología. La detección y determinación del foco de emisión de ondas gravitacionales sería un dato de la mayor importancia para dilucidar la historia de nuestro universo. Los primeros resultados, alentadores, de Weber no pueden, de momento, reproducirse y no pocos de los grupos experimentales que se habían propuesto su corroboración abandonaron el intento. Por este camino parece que habrá que esperar todavía algunos años para conseguir aparatos suficientemente sensibles, que alcancen mediciones aplicables a las teorías cosmológicas.

Otro punto de enorme interés cosmológico es el relativo a los quasars, sobre todo si llega a justificarse la hipótesis que afirma que su corrimiento hacia el rojo es cosmológico. Y digo bien justificar porque existen opiniones contradictorias sobre el particular que se basan en observaciones divergentes. Si el corrimiento fuera cosmológico, los quasars constituirían una imagen de nuestro universo en sus primeros millones de años. Si el corrimiento hacia el rojo fuera gravitacional, estarían más cerca de nosotros, pero entonces poseerían una enorme masa central, del orden de 10^7-10^8 masas solares; por lo que la creación de los mismos no dejaría de plantear un problema cosmológico notable. En este último caso perdería su validez la ley de Hubble y, cabe preguntarse, si no es cierta para los quasars por qué iba a serlo para los demás astros del universo. Una de las últimas teorías sobre los quasars viene expuesta por el profesor Wheeler en *General Relativity and Gravitation*, correspondiente al mes de marzo de 1978; viene a ser una opinión intermedia entre las dos expuestas, lo cual no deja de complicar el problema.

La impresión de cierta ambigüedad que resulta de la lectura del libro está justificada. La cosmología no es ninguna ciencia totalmente conclusa. Como explica el profesor M. Rees, "los datos actuales son, todavía, limitados, ambiguos y fragmentarios...; quién sabe si nuestras ideas actuales van a ser contradichas y enterradas algún día, tal como ocurrió con los epiciclos de Ptolomeo".

Desde una óptica pesimista, cabe pensar en la posibilidad de que los datos actuales encajen en un modelo de gran explosión, en razón del escaso número de pruebas experimentales y que, conforme vayan sobreviniendo, habrá que complicarlo más o, quizá, también tengamos que desechar todos los modelos hoy propuestos. Esta desazón nos lleva al capítulo de cierre, que firma el profesor Taylor, muy personal y polémico en sus conclusiones, sobre todo para los cosmólogos antiguos, que habrán de quedar asombrados de la dialéctica científica seguida a la hora de resolver el problema de la existencia o no de la mente como algo distinto de todo

lo material o energético. En mi opinión, tan espinoso problema no puede resolverse todavía con los escasos datos de que disponemos. Una hipótesis más cauta, como la del profesor McCrea, me parece más correcta u oportuna.

En resumen, el libro es de lectura muy interesante por las controversias y problemas que suscita y plantea, consiguiendo un nivel de comprensión y divulgación del problema muy aceptable, como ocurre casi siempre que el nivel científico de los autores es elevado. Y éste es indiscutiblemente el caso. (L. M.)

MOSQUITOES, MALARIA AND MAN: A HISTORY OF THE HOSTILITIES SINCE 1880, por Gordon Harrison. E. P. Dutton. "Lo más sorprendente que tienen es sin duda, el pigmento. Nunca lo había visto en otros mosquitos, y llevo ya examinando cientos de ellos, si no miles." Bajo la lente del objetivo de inmersión en aceite está el estómago diseccionado de un gran mosquito marrón de alas moteadas, el último insecto de los 10 que se alimentaron con la sangre del enfermo de malaria Husein Khan. Hace 80 años, en una obscura y calurosa oficina del hospital del ejército británico en Begumpett, el comandante Ronald Ross, cirujano del servicio médico hindú, escudriñaba el tubo. Ross era un hombre agraciado y arrogante, de unos 40 años, mitad diletante y mitad devoto incansable. Estaba convencido de que llegaría a ser famoso, ya por la nueva álgebra que él creía haber descubierto, por su verso romántico y las novelas que soñaba escribir, o incluso por la bacteriología que había estudiado durante un par de meses en St. Bartholomew. El mosquito con las alas moteadas lo consiguió. Ross escribió entonces en líneas rígidas de letra picuda: "En el día de hoy por la misericordia de Dios/ocurrió en mis mismas manos/ una cosa maravillosa... buscando entre Sus secretos designios/con lágrimas y aliento entrecortado/encuentro las astutas semillas/de la Muerte asesina de millones". El pigmento de Ross fue la pista negra de los parásitos unicelulares que habitan durante cierto tiempo en los glóbulos rojos de su huésped, comiéndose la rica proteína oxidante; por más de 40 años se había creído que se trataba de una hemoglobina degradada que proliferaba en los leucocitos de la sangre afectada de malaria. Su verso esotérico no exageraba mucho. En pocos años se desentrañó el complejo ciclo vital de la infección del protozoo, infección cuyo remoto origen trasciende al de nuestra propia especie.

Más de una tercera parte de esta crónica, crítica y cercana a las fuentes, de enorme viveza, está dedicada a narrar la solución al rompecabezas de la malaria. El héroe es Ross, aislado en su trabajo, aunque no en total soledad. Durante sus cinco años de investigación estuvo ligado al mundo científico por una revista mensual y por una correspondencia fiel con su conocido patrocinador y mentor de Harley Street, Patrick Manson. Le tocó a un poderoso grupo italiano completar la estructura que Ross había expuesto ampliamente en la India (Ross y Giovani Grassi entablarían una polémica sin fin en torno a la patente): la prueba final de que los mosquitos del género *Anopheles* eran los transmisores de la malaria, y de que el parásito *Plasmodium* seguía el mismísimo camino que Ross había colegido, aunque sólo podía demostrarlo plenamente en la enfermedad correspondiente de las aves.

Pero el valor del libro no estriba tanto en esta sutil intuición cuanto en una crítica de la subsiguiente gran campaña librada en el campo. El escenario abarcaba desde el mundo pantanoso de la campiña romana, en donde señoreaba el enemigo al caer la noche, hasta otras lejanas tierras tropicales sometidas al yugo europeo. El propio Ross midió sus armas contra *Anopheles* en Liberia, pero fracasó. La ciudad era demasiado grande, demasiado llana, demasiado sucia, demasiado pobre. Tan sólo había un puesto fresco y en alto para el Civil Service que podía salvar a los colonos de los protozoos y los africanos. Hubo otras derrotas tropicales parecidas a la pérdida de Freetown. William Gorgas, médico del ejército americano, obtuvo por fin una brillante victoria en la zona del canal. El pequeño ejército de Gorgas saneó la zona en 10 años, a base de drenar, envenenar, cribar y matar mosquitos; pero el precio salió caro en dólares por hectárea y en control militar requerido para el comportamiento humano. También en Italia, bajo el fascismo, las fuertes inversiones en drenar las tierras y volver a poblarlas, contribuyeron a mejorar las zonas pantanosas de Pontino, y la antigua enfermedad cedió.

Los sistemas de colonización agrícola en Europa y América tuvo un efecto duradero. Los pequeños cambios en todos los parámetros de difusión suponen una gran diferencia para la malaria. Es una enfermedad con adaptaciones exquisitas, y aspectos tales como el paisaje agrícola o costumbres humanas pueden inclinar la balanza, aun cuando nadie sepa nunca a ciencia cierta en qué sentido. Eso es lo que ocurre en las zonas malarias del mundo templado; en las largas, húmedas y cálidas estaciones de esas regiones tropicales, las generaciones espontáneas de un transmisor y parásito bien adaptado sobreviven a pocos cambios para estallar en proporciones epidémicas en el momento en que la defensa se debilite o que el tiempo favorezca la delicada larva. Así ocurrió en Ceilán en 1934. Después de muchos años de clima desfavorable para el cultivo, cayeron los dos monzones. Los arroyos repentinos formaron millares de charcas. Antes de que volviesen las lluvias en 1935, un tercio de la población contrajo la enfermedad y murieron 80.000 personas. Los matemáticos podían explicarlo, pero no servía de consuelo. La enfermedad hizo un intento desesperado en Brasil a finales de la década de 1930. El gobierno y la Fundación Rockefeller (a la sazón implicada mundialmente en la lucha contra esta enfermedad) actuaron pronto y bien. Se emplearon contra las fuerzas invasoras, de la especie africana traída por barco a la costa de Brasil, pulverizadores de Pyrenthrum. Para 1941 se acabó con los invasores; el recuento de cuerpo proporciona la fecha exacta de la muerte de la penúltima larva. Pero la malaria endémica sigue existiendo.

El último dardo, el barato, duradero y tóxico DDT, proporcionó el sueño de una solución definitiva (de la que el Africa subsahariana estuvo excluida desde un principio). Dondequiera que se probó el DDT, la malaria se retiró antes del ataque de estos batallones, desde Nápoles en 1944 hasta la India y Sri Lanka para las postrimerías de la década de 1960. El arsenal estaba constituido por los jeeps y los pulverizadores; la orden permanente era echar dos gramos de DDT al año por metro cuadrado de pared en cada cabaña. Los soldados eran numerosos, y se necesitaban, aunque no siempre persistían, oficiales competentes, inspectores y patrullas vigilantes para localizar refugiados escondidos. El grito de batalla era exterminación. Esta técnica audaz y demasiado simple fracasó en muchos aspectos, sobre todo, al provocar el aumento de tolerancia al veneno por parte del astuto enemigo. La malaria se ha debilitado hoy día, pero es indomable, y está resurgiendo sobre todo en Asia "donde la batalla parecía casi ganada". En la India hubo unos 75 millones de casos en 1950, uno por ciento de ellos mortales. El número bajó en uno por mil en una década de campaña fuerte, pero para 1976 el número de casos volvió a aumentar hasta casi los 10 millones. La Organización Mundial de la Salud cambió la denominación, demasiado pretenciosa, de su "División de Exterminación de la Malaria" en 1973; el control sustituyó al asalto. En esto consistía la antigua sabiduría y vuelve a serlo la nueva: como nuestros adversarios, debemos hacernos flexibles y adaptarnos. Pero sólo nosotros nos damos cuenta de ello.

Esta guerra no terminará con una rendición incondicional, ya que mil millones de generaciones de selección lo hacen improbable. El *Homo sapiens* necesita protegerse contra el *Plasmodium* para los tiempos venideros, profundizando año tras año en su mente y organizaciones, aportando un gen cada 10.000 años contra los lábiles códigos del enemigo que "asesina por millones". (Ph. M.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

ENERGIA DE FUSION CON HACES DE PARTICULAS

ELECTRON BEAM FOCUSING AND APPLICATION TO PULSED FUSION. G. Yonas, J. W. Poukey, K. R. Prestwich, J. R. Freeman, A. J. Toepfer y M. J. Clauser en *Nuclear Fusion*, vol. 14, n.º 5, págs. 731-740; 1974.

FOCUSED INTENSE ION BEAMS USING SELF-PINCHED RELATIVISTIC ELECTRON BEAMS. Shyke A. Goldstein y Roswell Lee en *Physical Review Letters*, vol. 35, págs. 1079-1082; 20 de octubre de 1975.

PROPAGATION OF PINCHED ELECTRON BEAMS FOR PELLET FUSION. P. A. Miller, R. I. Butler, M. Cowan, J. R. Freeman, J. W. Poukey, T. P. Wright y G. Yonas en *Physical Review Letters*, vol. 39, n.º 2, págs. 92-98; 11 julio, 1977.

EL ENSAMBLAJE DE UN VIRUS

THE STRUCTURE OF THE PROTEIN DISK OF TOBACCO MOSAIC VIRUS TO 5 Å RESOLUTION. J. N. Champness, A. C. Bloomer, G. Bricogne, P. J. G. Butler y A Klug en *Nature*, vol. 259, págs. 20-24; 1 y 8 de enero de 1976.

TOBACCO MOSAIC VIRUS PROTEIN AGGREGATION AND THE VIRUS ASSEMBLY. P. Jonathan G. Butler y Anthony C. H. Durham en *Advances in Protein Chemistry*, vol. 31, págs. 187-251, 1977.

CONFIGURATION OF TOBACCO MOSAIC VIRUS DURING VIRUS ASSEMBLY. J. T. Finch y D. Zimmern en *Nature*, vol. 265, págs. 217-219; 20 de enero de 1977.

THE ISOLATION OF TOBACCO MOSAIC VIRUS RNA FRAGMENTS CONTAINING THE ORIGIN FOR VIRAL ASSEMBLY. David Zimmern y P. J. G. Butler en *Cell*, vol. 11, págs. 455-462; julio, 1977.

LA OPTICA DE RAYOS X DE LONGITUD DE ONDA LARGA

X-RAY MICROSCOPY IN CLINICAL AND EXPERIMENTAL MEDICINE. T. A. Hall, H. O. E. Röckert, R. L. de C. H. Saunders. Charles C Thomas, Publisher, 1972.

HIGH-RESOLUTION PATTERN REPLICATION USING SOFT X RAYS. D. L. Spears y Henry I. Smith en *Electronics Letters*, vol. 8, n.º 4, págs. 102-104; febrero, 1972.

S056 X-RAY TELESCOPE EXPERIMENT ON THE SKYLAB APOLLO TELESCOPE MOUNT. J. H. Underwood, J. E. Milligan, A. C. DeLoach y R. B. Hoover en *Applied Optics*, vol. 16, n.º 4, págs. 858-869; abril, 1977.

MOSAICOS ROMANOS DE MERIDA

INFORME SOBRE LAS CASAS ROMANAS DE MERIDA Y EXCAVACIONES EN LA CASA DEL ANFITEATRO. E. García Sandoval, Madrid, 1966.

AUGUSTA EMERITA. ACTAS DEL SIMPOSIO INTERNACIONAL CONMEMORATIVO DEL BIMILENARIO DE MERIDA. Madrid, Ministerio de Educación y Ciencia, 1976.

LA VILLA ROMANA DE EL HINOJAL EN LA DEHESA DE LAS TIENDAS (MERIDA). José M.ª Alvarez, en *Noticiario Arqueológico Hispánico IV*, Madrid, 1976, 433 y ss.

CORPUS DE MOSAICOS ROMANOS DE ESPAÑA. FASCICULO I. MOSAICOS ROMANOS DE MERIDA. Antonio Blanco Freijeiro, Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1978.

CUMULOS RICOS DE GALAXIAS

CLUSTERING OF GALAXIES. George O. Abell en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 3, dirigido por Leo Goldberg, Armin J. Deutsch y David Layzer, Annual Reviews, Inc., 1965.

THE STRUCTURE OF ELLIPTICAL AND cD GALAXIES. Augustus Oemler en *The Astrophysical Journal*, vol. 209, n.º 3, Parte 1, págs. 693-709, 1 de noviembre de 1976.

LOS MECANISMOS DEL MECANIZADO POR ABRASION

THE ABRASION OF METALS: A MODEL OF THE PROCESS. T. O. Mulhearn y L. E. Samuels en *Wear*, vol. 5, n.º 6, págs. 478-498; noviembre/diciembre, 1962.

MECHANISM OF ABRASIVE POLISHING. R. L. Aghan y L. E. Samuels en *Wear*, vol. 16, n.º 4, págs. 293-301; octubre, 1970.

ABRASIVES. L. Coes, Jr. Springer-Verlag, 1971.

EL SISTEMA DE RECOMPENSA DEL CEREBRO

THE ORGANIZATION OF THE ASCENDING CATECHOLAMINE NEURON SYSTEMS IN THE RAT BRAIN AS REVEALED BY THE GLYOXYLIC ACID FLUORESCENCE METHOD. Olle Lindvall y Anders Björklund en *Acta Physiologica Scandinavica Supplementum 412*, págs. 1-48; 1974.

BRAIN STIMULATION REWARD. Albert Wauquier y Edmund T. Rolls. North-Holland Publishing Company, 1976.

DRIVES AND REINFORCEMENTS: BEHAVIORAL STUDIES OF HYPOTHALAMIC FUNCTIONS. James Olds. Raven Press, 1977.

THE ROLE OF PREFRONTAL CORTEX IN INTRACRANIAL SELF-STIMULATION. Aryeh Routtenberg y Rebecca Santos-Anderson en *Handbook of Psychopharmacology*: vol. 8, dirigido por Leslie L. Iversen, Susan D. Iversen y Solomon H. Snyder. Plenum Press, 1977.

EL SISTEMA DE CONTROL DE VUELO DE LOS HERMANOS WRIGHT

HOW WE INVENTED THE AIRPLANE. Orville Wright, dirigido por Fred C. Kelly. David McKay Co., Inc., 1953.

THE INVENTION OF THE AEROPLANE (1799-1909). Charles H. Gibbs-Smith. Faber and Faber, 1966.

JUEGOS MATEMATICOS

PACKING A BOX WITH Y-PENTACUBES. C. J. Bouwkamp y D. A. Klarner en *Journal of Recreational Mathematics*, vol. 3, n.º 1, págs. 10-26; enero, 1970.

MAX BILL. Introducción de James Woods, texto de Lawrence Alloway. Buffalo Fine Arts Academy y Albright-Knox Art Gallery, Buffalo, 1974.

MAX BILL: SUPERB PURITAN. Robert Hughes en *Time*, vol. 104, págs. 100-101; 18 de noviembre de 1974.

ANNO 1968-1977. Mitsumasa Anno. Kodansha, 1977.

TALLER Y LABORATORIO

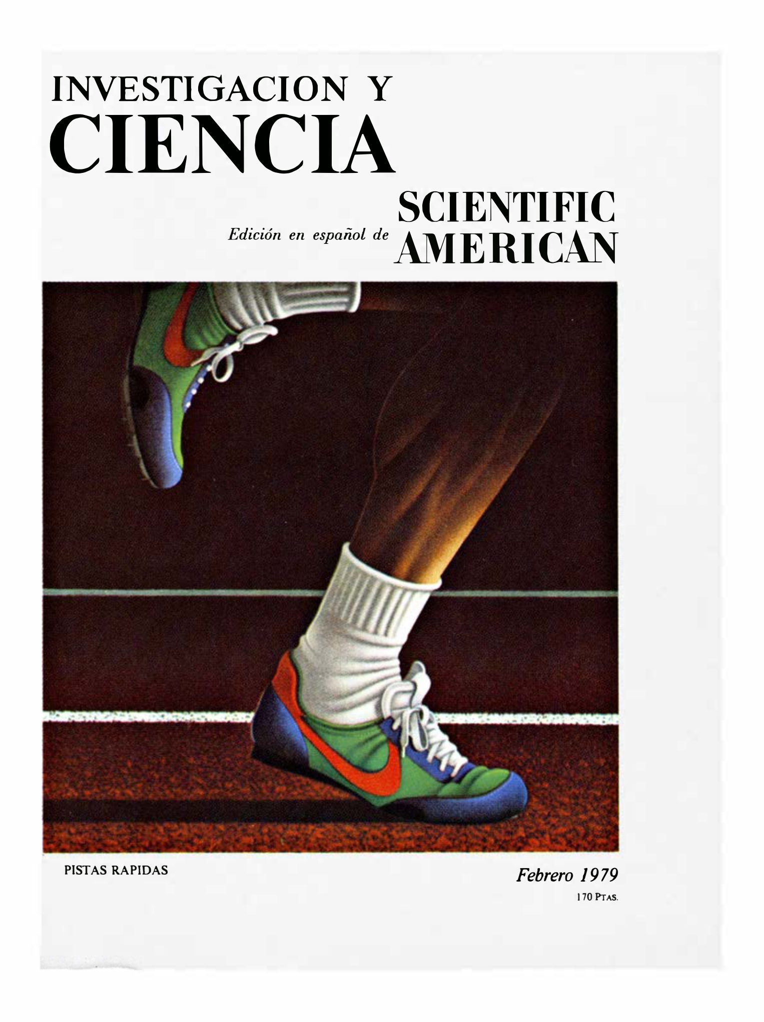
DEMONSTRATIONS WITH VISCOELASTIC LIQUIDS. A. A. Collyer en *Physics Education*, vol. 8, n.º 2, págs. 111-116; marzo, 1973.

TIME INDEPENDENT FLUIDS. A. A. Collyer en *Physics Education*, vol. 8, n.º 5, págs. 333-338; julio, 1973.

TIME DEPENDENT FLUIDS. A. A. Collyer en *Physics Education*, vol. 9, n.º 1, págs. 38-44; enero, 1974.

VISCOELASTIC FLUIDS. A. A. Collyer en *Physics Education*, vol. 9, n.º 5, págs. 313-321; julio, 1974.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



ESTRUCTURA DE LA HEMOGLBINA Y TRANSPORTE RESPIRATORIO, por M. F. Perutz
La hemoglobina transporta oxígeno desde los pulmones a los tejidos y colabora en el transporte del dióxido de carbono devolviéndolo a los pulmones. Cumple este doble papel al transformarse sucesivamente en dos estructuras alternativas.

OJOS ANIMALES DONDE LA IMAGEN SE FORMA MEDIANTE ESPEJOS, por Michael F. Land
Actualmente se construyen espejos cuyas superficies reflectoras están formadas por múltiples capas finas y no por una sola placa metálica. Resulta que varios tipos de animales tienen ojos basados en el mismo sistema.

EL ASOLADO TEMPLO DE AKENATON, por Donald B. Redford
El faraón que quería que Egipto adorase a un solo dios erigió monumentos imponentes en Karnak. A sus sucesores les costó mucho intentar emularle. Ahora se está deduciendo, a partir de los fragmentos, cómo eran estos monumentos.

MATRIMONIO Y FERTILIDAD EN LOS PAISES DESARROLLADOS, por Charles F. Westoff
La disminución del índice de natalidad en los países industrializados es, a la vez, causa y consecuencia de los cambios ocurridos en el matrimonio y la familia. ¿Cómo responderán las naciones a esta reducción a lago plazo de la población?

MOLECULAS NUCLEARES, por D. Allan Bromley
A ciertas energías, los protones y neutrones de los núcleos forman racimos, que se mueven los unos con respecto a los otros en órbitas sencillas. Estas moléculas nucleares constituyen una nueva clase de estructura y dinámica nucleares.

CENTRALES ENERGETICAS DE CELULAS DE COMBUSTIBLE, por Arnold P. Fickett
Generan electricidad directamente a partir del combustible, sin emitir contaminantes. Se está estudiando su rentabilidad económica.

NEBULOSAS GASEOSAS, por Eric J. Chaisson
Esas nubes espectaculares dentro de nuestra galaxia constituyen sedes de formación de estrellas. La radioespectroscopía indica, entre otras cosas, que las nubes pertenecen a sistemas mucho mayores de gas y polvo.

MECANISMO MOLECULAR DE LA TRANSDUCCION DE ENERGIA, por Emilio Muñoz y J. Manuel Andreu
La transducción de energía, uno de los problemas fundamentales de la biología, ha encontrado al parecer el camino hacia una solución a través de la teoría quimiosmótica.

